

# **Teplotní stabilita luminoforů v PDMS matrici pro zářivé zdroje**

Thermal stability of phosphorus within PDMS matrix for luminous sources

Bc. Michal Hřiva

Diplomová práce

Vedoucí práce: prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.

Ostrava, 2021

## **Abstrakt**

Cílem této práce je prozkoumat teplotní stabilitu luminoforů v polydimethylsiloxanové (PDMS) matrici pro zářivé zdroje. Je potřeba vytvořit z PDMS matrici smíchaný s luminoforem pro vygenerování bílého světla za pomoci modré laser diody a změřit a vyhodnotit parametry jako je intenzita, vlnová délka, index podání barev a teplota chromatičnosti.

K této práci jsou potřeba zejména PDMS vzorky smíchaný s luminoforem, modrý laser, PDMS materiál s tvrdidlem, laboratorní pomůcky, přístroj pro kalibraci teploty během měření, teploměr, spektrometr a software pro spektrometr.

## **Klíčová slova**

Polydimethylsiloxan, PDMS, luminofor, laser, vlnová délka, index podání barev, teplota chromatičnosti, teplotní namáhání, teplotní stabilita, spektrum

## **Abstract**

The purpose of this diploma thesis is to examine the thermal stability of phosphorus within polydimethylsiloxane (PDMS) matrix for luminous sources. For this thesis it is necessary to create a matrix from the PDMS mixed with phosphorus to generate white light with blue laser diode and to measure and analyze parameters such as intensity, wavelength, color rendering index and correlated colour temperature.

In order to successfully measure and analyze these parameters following equipment is required. PDMS samples mixed with phosphorus, blue laser, PDMS material with hardener, laboratory tools, device for thermal calibration, thermometer, spectrometer and software for the spectrometer.

## **Keywords**

Polydimethylsiloxane, PDMS, phosphorus, laser, wavelength, color rendering index, correlated colour temperature, thermal load, thermal stability, spectrum

## **Poděkování**

Rád bych na tomto místě poděkoval prof. RNDr. Vladimíru Vašínkovi, CSc. za odbornou pomoc a konzultace při realizaci této diplomové práce, dále bych chtěl poděkovat Mgr. Janu Jargusovi za konzultace a spolupráci v laboratoři.

# Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	6
Seznam obrázků	7
Seznam tabulek	12
<b>1 Úvod</b>	<b>16</b>
<b>2 Zdroje záření</b>	<b>17</b>
2.1 LED . . . . .	17
2.2 Laser . . . . .	19
<b>3 Luminiscence</b>	<b>22</b>
3.1 Fluorescence . . . . .	22
3.2 Fosforescence . . . . .	23
<b>4 Kolorimetrie</b>	<b>24</b>
4.1 Diagram chromatičnosti . . . . .	24
4.2 Teplota chromatičnosti . . . . .	25
4.3 Index podání barev . . . . .	26
<b>5 Polydimethylsiloxan</b>	<b>28</b>
5.1 Sylgard . . . . .	29
5.2 Sylgard 184 . . . . .	29
5.3 Sylgard 170 . . . . .	29
5.4 Sylgard 517 . . . . .	29
5.5 Typické vlastnosti PDMS . . . . .	30
<b>6 Výroba vzorků</b>	<b>31</b>
6.1 Příprava PDMS . . . . .	31
6.2 Přidání luminoforu do PDMS vzorku . . . . .	32



<b>7</b>	<b>Měřicí pracoviště</b>	<b>39</b>
7.1	Použité přístroje . . . . .	41
<b>8</b>	<b>Měření</b>	<b>45</b>
8.1	Vzorek s koncentrací luminoforu 1:2 . . . . .	48
8.2	Vzorek s koncentrací luminoforu 1:50 . . . . .	77
8.3	Vzorek s koncentrací luminoforu 1:100 . . . . .	107
8.4	Vzorek s koncentrací luminoforu 1:200 . . . . .	137
<b>9</b>	<b>Porovnání výsledků mezi jednotlivými koncentracemi vzorků</b>	<b>167</b>
9.1	Porovnání postupného zvyšování teploty vzorku . . . . .	167
9.2	Porovnání pozvolného ochlazování . . . . .	171
9.3	Porovnání prudkého ochlazování . . . . .	178
9.4	Porovnání měření opakovaného namáhání . . . . .	186
<b>10</b>	<b>Závěr</b>	<b>195</b>
	<b>Literatura</b>	<b>198</b>

# Seznam použitých zkratek a symbolů

LED	– Light emitting diode
Laser	– Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
$\lambda[nm]$	– Vlnová délka
CCT	– Correlated Colour Temperature
$T_c[K]$	– Teplota chromatičnosti
CRI	– Color rendering index
$R_a[-]$	– Index podání barev
PDMS	– Polydimethylsiloxan
AEL	– Allowable Exposure Limit

# Seznam obrázků

4.1	Diagram chromatičnosti (x,y) . . . . .	24
4.2	Diagram chromatičnosti (u',v') . . . . .	24
4.3	CIE 1931 funkce pro shodu barev . . . . .	25
4.4	14 testovacích barev pro výpočet $R_a$ . . . . .	26
5.1	Chemické složení PDMS [9] . . . . .	28
6.1	Sylgard 184. . . . .	31
6.2	Smíchaný elastomer s činidlem. . . . .	32
6.3	Luminofor QMK58/F-U2 . . . . .	33
6.4	Proces přidávání luminoforu do PDMS ve skleněném boxu. . . . .	34
6.5	Laboratorní míchačka . . . . .	34
6.6	Výsledný promíchaný vzorek . . . . .	35
6.7	Vzorek před zapékáním ve čtvercové formě . . . . .	35
6.8	Vzorek před zapékáním v obdélníkové formě . . . . .	36
6.9	Finální vzorek po vyjmutí ze čtvercové formy . . . . .	36
6.10	Finální vzorek po vyjmutí z obdélníkové formy . . . . .	37
6.11	Finální vzorky upravené pro měření (zleva poměr 1:2, 1:50, 1:100 a 1:200) . . . . .	37
6.12	Šířka měřeného vzorku . . . . .	38
7.1	Schéma měřicí soustavy . . . . .	39
7.2	Měřicí soustava . . . . .	40
7.3	Měřicí soustava se zatemňovacím boxem . . . . .	40
7.4	Laser 450 nm . . . . .	41
7.5	Teploměr . . . . .	42
7.6	DG 10-220-MD a DG 10-600-MD . . . . .	43
7.7	USB4000 . . . . .	44
8.1	Postupné zvyšování teploty . . . . .	46
8.2	Pozvolné ochlazování vzorku . . . . .	46

8.3	Prudké ochlazení . . . . .	47
8.4	Měření po určité době . . . . .	47
8.5	Index podání barev při postupném zahřívání . . . . .	50
8.6	Teplota chromatičnosti při postupném zahřívání . . . . .	50
8.7	Spektrální charakteristika měření zvyšování teploty . . . . .	51
8.8	Index podání barev při zahřívání . . . . .	55
8.9	Teplota chromatičnosti při zahřívání . . . . .	55
8.10	Index podání barev při ochlazování . . . . .	56
8.11	Teplota chromatičnosti při ochlazování . . . . .	56
8.12	Index podání barev při zahřívání i ochlazování . . . . .	57
8.13	Teplota chromatičnosti barev při zahřívání i ochlazování . . . . .	57
8.14	Spektrální charakteristika měření pozvolného ochlazování při zahřívání vzorku . . . .	58
8.15	Spektrální charakteristika měření pozvolného ochlazování při ochlazování vzorku . .	58
8.16	Index podání barev před prudkým ochlazením . . . . .	63
8.17	Teplota chromatičnosti před prudkým ochlazením . . . . .	63
8.18	Index podání barev po prudkém ochlazení . . . . .	64
8.19	Teplota chromatičnosti po prudkém ochlazení . . . . .	64
8.20	Index podání barev při prudkém ochlazení . . . . .	65
8.21	Teplota chromatičnosti při prudkém ochlazení . . . . .	65
8.22	Spektrální charakteristika měření prudkého ochlazení při prvním zahřívání vzorku .	66
8.23	Spektrální charakteristika měření prudkého ochlazení při druhém zahřívání vzorku .	66
8.24	Index podání barev po prvním namáhání vzorku . . . . .	71
8.25	Teplota chromatičnosti po prvním namáhání vzorku . . . . .	71
8.26	Index podání barev po druhém namáhání vzorku . . . . .	72
8.27	Teplota chromatičnosti po druhém namáhání vzorku . . . . .	72
8.28	Index podání barev při opakovaném namáhání vzorku . . . . .	73
8.29	Teplota chromatičnosti při opakovaném namáhání vzorku . . . . .	73
8.30	Spektrální charakteristika po prvním namáhání vzorku . . . . .	74
8.31	Spektrální charakteristika po druhém namáhání vzorku . . . . .	74
8.32	Index podání barev při postupném zahřívání . . . . .	79
8.33	Teplota chromatičnosti při postupném zahřívání . . . . .	79
8.34	Spektrální charakteristika měření zvyšování teploty . . . . .	80
8.35	Index podání barev při zahřívání vzorku . . . . .	84
8.36	Teplota chromatičnosti při zahřívání vzorku . . . . .	85
8.37	Index podání barev při ochlazování vzorku . . . . .	85
8.38	Teplota chromatičnosti při ochlazování vzorku . . . . .	86
8.39	Index podání barev při zahřívání i ochlazování vzorku . . . . .	86
8.40	Teplota chromatičnosti při zahřívání i ochlazování vzorku . . . . .	87

8.41	Spektrální charakteristika zahřívání vzorku . . . . .	87
8.42	Spektrální charakteristika ochlazování vzorku . . . . .	88
8.43	Index podání barev při zahřívání vzorku . . . . .	92
8.44	Teplota chromatičnosti při zahřívání vzorku . . . . .	93
8.45	Index podání barev po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	93
8.46	Teplota chromatičnosti po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	94
8.47	Index podání barev před a po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	94
8.48	Teplota chromatičnosti před a po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	95
8.49	Spektrální charakteristika zahřívání vzorku . . . . .	95
8.50	Spektrální charakteristika po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	96
8.51	Index podání barev po prvním namáhání vzorku . . . . .	100
8.52	Teplota chromatičnosti po prvním namáhání vzorku . . . . .	101
8.53	Index podání barev po druhém namáhání vzorku . . . . .	101
8.54	Teplota chromatičnosti po druhém namáhání vzorku . . . . .	102
8.55	Index podání barev při opakovaném namáhání vzorku . . . . .	102
8.56	Teplota chromatičnosti při opakovaném namáhání vzorku . . . . .	103
8.57	Spektrální charakteristika prvního namáhání vzorku . . . . .	103
8.58	Spektrální charakteristika druhého namáhání vzorku . . . . .	104
8.59	Index podání barev při postupném zahřívání . . . . .	109
8.60	Teplota chromatičnosti při postupném zahřívání . . . . .	109
8.61	Spektrální charakteristika měření zvyšování teploty . . . . .	110
8.62	Index podání barev při zahřívání vzorku . . . . .	114
8.63	Teplota chromatičnosti při zahřívání vzorku . . . . .	115
8.64	Index podání barev při ochlazování vzorku . . . . .	115
8.65	Teplota chromatičnosti při ochlazování vzorku . . . . .	116
8.66	Index podání barev při zahřívání i ochlazování vzorku . . . . .	116
8.67	Teplota chromatičnosti při zahřívání i ochlazování vzorku . . . . .	117
8.68	Spektrální charakteristika zahřívání vzorku . . . . .	117
8.69	Spektrální charakteristika ochlazování vzorku . . . . .	118
8.70	Index podání barev při zahřívání vzorku . . . . .	122
8.71	Teplota chromatičnosti při zahřívání vzorku . . . . .	123
8.72	Index podání barev po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	123
8.73	Teplota chromatičnosti po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	124
8.74	Index podání barev před a po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	124
8.75	Teplota chromatičnosti před a po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	125
8.76	Spektrální charakteristika zahřívání vzorku . . . . .	125
8.77	Spektrální charakteristika po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	126
8.78	Index podání barev po prvním namáhání vzorku . . . . .	130

8.79	Teplota chromatičnosti po prvním namáhání vzorku . . . . .	131
8.80	Index podání barev po druhém namáhání vzorku . . . . .	131
8.81	Teplota chromatičnosti po druhém namáhání vzorku . . . . .	132
8.82	Index podání barev při opakovaném namáhání vzorku . . . . .	132
8.83	Teplota chromatičnosti při opakovaném namáhání vzorku . . . . .	133
8.84	Spektrální charakteristika prvního namáhání vzorku . . . . .	133
8.85	Spektrální charakteristika druhého namáhání vzorku . . . . .	134
8.86	Index podání barev při postupném zahřívání . . . . .	139
8.87	Teplota chromatičnosti při postupném zahřívání . . . . .	139
8.88	Spektrální charakteristika měření zvyšování teploty . . . . .	140
8.89	Index podání barev při zahřívání vzorku . . . . .	144
8.90	Teplota chromatičnosti při zahřívání vzorku . . . . .	145
8.91	Index podání barev při ochlazování vzorku . . . . .	145
8.92	Teplota chromatičnosti při ochlazování vzorku . . . . .	146
8.93	Index podání barev při zahřívání i ochlazování vzorku . . . . .	146
8.94	Teplota chromatičnosti při zahřívání i ochlazování vzorku . . . . .	147
8.95	Spektrální charakteristika zahřívání vzorku . . . . .	147
8.96	Spektrální charakteristika ochlazování vzorku . . . . .	148
8.97	Index podání barev při zahřívání vzorku . . . . .	152
8.98	Teplota chromatičnosti při zahřívání vzorku . . . . .	153
8.99	Index podání barev po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	153
8.100	Teplota chromatičnosti po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	154
8.101	Index podání barev před a po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	154
8.102	Teplota chromatičnosti před a po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	155
8.103	Spektrální charakteristika zahřívání vzorku . . . . .	155
8.104	Spektrální charakteristika po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	156
8.105	Index podání barev po prvním namáhání vzorku . . . . .	160
8.106	Teplota chromatičnosti po prvním namáhání vzorku . . . . .	161
8.107	Index podání barev po druhém namáhání vzorku . . . . .	161
8.108	Teplota chromatičnosti po druhém namáhání vzorku . . . . .	162
8.109	Index podání barev při opakovaném namáhání vzorku . . . . .	162
8.110	Teplota chromatičnosti při opakovaném namáhání vzorku . . . . .	163
8.111	Spektrální charakteristika prvního namáhání vzorku . . . . .	163
8.112	Spektrální charakteristika druhého namáhání vzorku . . . . .	164
9.1	Porovnání naměřených $\lambda$ všech koncentrací při zahřívání vzorků . . . . .	169
9.2	Porovnání naměřených indexů podání barev všech koncentrací při zahřívání vzorků . . . . .	169
9.3	Porovnání naměřených teplot chromatičností všech koncentrací při zahřívání vzorků . . . . .	170

9.4	Porovnání naměřených $\lambda$ všech koncentrací při zahřívání vzorků . . . . .	172
9.5	Porovnání naměřených $\lambda$ všech koncentrací při ochlazování vzorků . . . . .	173
9.6	Porovnání naměřených indexů podání barev všech koncentrací při zahřívání vzorků .	174
9.7	Porovnání naměřených indexů podání barev všech koncentrací při ochlazování vzorků	175
9.8	Porovnání naměřené teploty chromatičnosti všech koncentrací při zahřívání vzorků .	176
9.9	Porovnání naměřené teploty chromatičnosti všech koncentrací při ochlazování vzorků	177
9.10	Porovnání naměřených $\lambda$ všech koncentrací při zahřívání vzorků . . . . .	179
9.11	Porovnání naměřených $\lambda$ všech koncentrací po ochlazení vzorků . . . . .	180
9.12	Porovnání naměřených indexů podání barev všech koncentrací při zahřívání vzorků .	181
9.13	Porovnání naměřených indexů podání barev všech koncentrací po prudkém ochlazení vzorků . . . . .	182
9.14	Porovnání naměřené teploty chromatičnosti všech koncentrací při zahřívání vzorků .	183
9.15	Porovnání naměřené teploty chromatičnosti všech koncentrací po prudkém ochlazení vzorků . . . . .	184
9.16	Porovnání naměřených $\lambda$ všech koncentrací při prvním zahřívání vzorků . . . . .	187
9.17	Porovnání naměřených $\lambda$ všech koncentrací po druhém teplotním namáhání vzorků .	188
9.18	Porovnání naměřených indexů podání barev všech koncentrací při prvním zahřívání vzorků . . . . .	189
9.19	Porovnání naměřených indexů podání barev všech koncentrací po druhém teplotním namáhání vzorků . . . . .	190
9.20	Porovnání naměřené teploty chromatičnosti všech koncentrací při prvním zahřívání vzorků . . . . .	191
9.21	Porovnání naměřené teploty chromatičnosti všech koncentrací po druhém teplotním namáhání vzorků . . . . .	192
9.22	Naměřené hodnoty vlnových délek pro vzorek s koncentrací 1:2 při měření postupného zvyšování teploty . . . . .	194

# Seznam tabulek

2.1	Přehled LED diod . . . . .	19
5.1	Typické vlastnosti PDMS [10], [?] . . . . .	30
7.1	Technické parametry [13] . . . . .	42
7.2	Parametry pro DG 10-220-MD a DG 10-600-MD . . . . .	43
8.1	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti . . . . .	48
8.2	Maximální naměřené hodnoty ve spektru . . . . .	49
8.3	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek . . . . .	49
8.4	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při zahřívání vzorku	52
8.5	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při ochlazování vzorku . . . . .	52
8.6	Maximální naměřené hodnoty ve spektru při zahřívání . . . . .	53
8.7	Maximální naměřené hodnoty ve spektru při ochlazování . . . . .	53
8.8	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek při zahřívání . . . . .	54
8.9	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek při ochlazování . . . . .	54
8.10	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti před ochlazením .	59
8.11	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti po ochlazení . . .	60
8.12	Maximální naměřené hodnoty ve spektru před ochlazením . . . . .	60
8.13	Maximální naměřené hodnoty ve spektru po ochlazením . . . . .	61
8.14	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek před ochlazením . . . . .	62
8.15	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po ochlazení . . . . .	62
8.16	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při prvním namá- háním vzorku . . . . .	67
8.17	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při druhém namá- háním vzorku . . . . .	68
8.18	Maximální naměřené hodnoty ve spektru při prvním namáhání . . . . .	68
8.19	Maximální naměřené hodnoty ve spektru při druhém namáhání . . . . .	69



8.20	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek při prvním namáhání vzorku . . . . .	70
8.21	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po druhém namáhání vzorku . . . . .	70
8.22	Průměrné naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti pro koncentraci vzorku 1:2 . . . . .	75
8.23	Průměrné naměřené hodnoty modrého světla intenzity a $\lambda$ pro koncentraci vzorku 1:2	75
8.24	Průměrné naměřené hodnoty širokopásmového světla intenzity a $\lambda$ pro koncentraci vzorku 1:2 . . . . .	76
8.25	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti . . . . .	77
8.26	Maximální naměřené hodnoty ve spektru při postupném zvyšování teploty . . . . .	78
8.27	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek . . . . .	78
8.28	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při zahřívání vzorku	81
8.29	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při ochlazování vzorku . . . . .	81
8.30	NMaximální naměřené hodnoty ve spektru při zahřívání vzorku . . . . .	82
8.31	Maximální naměřené hodnoty ve spektru při ochlazování vzorku . . . . .	83
8.32	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek pro zahřívání vzorku . . . . .	83
8.33	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek pro ochlazování vzorku . . . . .	84
8.34	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při zahřívání . . .	89
8.35	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti po prudkém ochlazení	89
8.36	Maximální naměřené hodnoty ve spektru při zahřívání vzorku . . . . .	90
8.37	NMaximální naměřené hodnoty ve spektru po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	91
8.38	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek pro zahřívání vzorku . . . . .	91
8.39	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	92
8.40	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při prvním zahřívání vzorku . . . . .	97
8.41	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při druhém zahřívání vzorku . . . . .	97
8.42	Maximální naměřené hodnoty ve spektru po prvním namáhání vzorku . . . . .	98
8.43	Maximální naměřené hodnoty ve spektru po druhém namáhání vzorku . . . . .	99
8.44	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po prvním namáhání vzorku . . . . .	99
8.45	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po druhém namáhání vzorku . . . . .	100
8.46	Průměrné naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti pro koncentraci vzorku 1:50 . . . . .	105
8.47	Průměrné naměřené hodnoty modrého světla intenzity a $\lambda$ pro koncentraci vzorku 1:50	106
8.48	Průměrné naměřené hodnoty širokopásmového světla intenzity a $\lambda$ pro koncentraci vzorku 1:50 . . . . .	106
8.49	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti . . . . .	107
8.50	Maximální naměřené hodnoty ve spektru při postupném zvyšování teploty . . . . .	108

8.51	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek . . . . .	108
8.52	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při zahřívání vzorku	111
8.53	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při ochlazování vzorku . . . . .	111
8.54	Maximální naměřené hodnoty ve spektru při zahřívání vzorku . . . . .	112
8.55	Maximální naměřené hodnoty ve spektru při ochlazování vzorku . . . . .	113
8.56	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek při zahřívání . . . . .	113
8.57	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek při ochlazování . . . . .	114
8.58	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při zahřívání . . .	119
8.59	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti po prudkém ochlazení	119
8.60	Maximální naměřené hodnoty ve spektru při zahřívání vzorku . . . . .	120
8.61	Maximální naměřené hodnoty ve spektru po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	121
8.62	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek pro zahřívání vzorku . . . . .	121
8.63	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	122
8.64	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při prvním zahřívání vzorku . . . . .	127
8.65	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při druhém zahřívání vzorku . . . . .	127
8.66	Maximální naměřené hodnoty ve spektru po prvním namáhání vzorku . . . . .	128
8.67	Maximální naměřené hodnoty ve spektru po druhém namáhání vzorku . . . . .	129
8.68	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po prvním namáhání vzorku . . . . .	129
8.69	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po druhém namáhání vzorku . . . . .	130
8.70	Průměrné naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti pro koncentraci vzorku 1:100 . . . . .	135
8.71	Průměrné naměřené hodnoty modrého světla intenzity a $\lambda$ pro koncentraci vzorku 1:100 . . . . .	136
8.72	Průměrné naměřené hodnoty širokopásmového světla intenzity a $\lambda$ pro koncentraci vzorku 1:100 . . . . .	136
8.73	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti . . . . .	137
8.74	Maximální naměřené hodnoty ve spektru při postupném zvyšování teploty . . . . .	138
8.75	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek . . . . .	138
8.76	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při zahřívání vzorku	141
8.77	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při ochlazování vzorku . . . . .	141
8.78	Maximální naměřené hodnoty ve spektru při zahřívání vzorku . . . . .	142
8.79	Maximální naměřené hodnoty ve spektru při ochlazování vzorku . . . . .	143
8.80	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek při zahřívání . . . . .	143
8.81	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek při ochlazování . . . . .	144

8.82	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při zahřívání . . .	149
8.83	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti po ochlazení . . .	149
8.84	Maximální naměřené hodnoty ve spektru při zahřívání vzorku . . . . .	150
8.85	Maximální naměřené hodnoty ve spektru po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	151
8.86	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek pro zahřívání vzorku . . . . .	151
8.87	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po prudkém ochlazení vzorku . . . . .	152
8.88	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při prvním zahřívání vzorku . . . . .	157
8.89	Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při druhém zahřívání vzorku . . . . .	157
8.90	Maximální naměřené hodnoty ve spektru po prvním namáhání vzorku . . . . .	158
8.91	Maximální naměřené hodnoty ve spektru po druhém namáhání vzorku . . . . .	159
8.92	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po prvním namáhání vzorku . . . . .	159
8.93	Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po druhém namáhání vzorku . . . . .	160
8.94	Průměrné naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti pro koncentraci vzorku 1:200 . . . . .	165
8.95	Průměrné naměřené hodnoty modrého světla intenzity a $\lambda$ pro koncentraci vzorku 1:200 . . . . .	166
8.96	Průměrné naměřené hodnoty širokopásmového světla intenzity a $\lambda$ pro koncentraci vzorku 1:200 . . . . .	166
9.1	Porovnání naměřených výsledků vlnových délek pro širokopásmové světlo při měření postupného zvyšování teploty . . . . .	167
9.2	Porovnání naměřených indexů podání barev při měření postupného zvyšování teploty	168
9.3	Porovnání naměřených teplot chromatičností při měření postupného zvyšování teploty	168
9.4	Porovnání naměřených výsledků vlnových délek pro širokopásmové světlo při měření pozvolného ochlazování . . . . .	171
9.5	Porovnání naměřených indexů podání barev při měření pozvolného ochlazování . . .	171
9.6	Porovnání naměřených teplot chromatičností při měření pozvolného ochlazování . . .	172
9.7	Porovnání naměřených výsledků vlnových délek pro širokopásmové světlo při měření prudkého ochlazování . . . . .	178
9.8	Porovnání naměřených indexů podání barev při měření prudkého ochlazování . . . .	178
9.9	Porovnání naměřených teplot chromatičností při měření prudkého ochlazování . . . .	179
9.10	Porovnání naměřených výsledků vlnových délek pro širokopásmové světlo při měření opakovaného namáhání vzorku . . . . .	186
9.11	Porovnání naměřených indexů podání barev při měření opakovaného namáhání vzorku	186
9.12	Porovnání naměřených teplot chromatičností při měření opakovaného namáhání vzorku	187

# Kapitola 1

## Úvod

Tato diplomopvá práce se zabývá problematikou teplotní stability materiálu z polydimethylsiloxanu (PDMS) se smíchaným luminoforem pro generování bílého světla na výstupu za pomoci modré laserové diody. Díky tomu že, PDMS se vyznačuje čistými optickými vlastnostmi, velkou ohebností a teplotní stabilitě se tento materiál jeví vhodně pro použití nových technologií v různých průmyslech.

V teoretické části této práce je věnována pozornost zdrojům záření, které se používají s PDMS, základům luminiscence a vysvětlení pojmů. Dále je věnována pozornost kolorimetrii s důrazem na měřené veličiny (index podání barev a teplota chromatičnosti). Následuje část, která popisuje PDMS materiál, jeho používané druhy a vlastnosti jak mechanické, tak i optické.

V praktické části je detailně zdokumentovaný postup výroby PDMS vzorků s následným přidavkem luminoforu, které jsou použity pro následné měření dále je popsán detailně měřící stanice s použitými přístroji. Samotné měření je rozděleno do čtyř částí, kde se zkoumají různé situace, které by mohly nastat při teplotním namáhání. Měření je rozděleno na postupné zvyšování teploty, pozvolné ochlazování, prudké ochlazení a teplotní namáhání po určité době. Zkoumá se intenzita a její vlnová délka jak pro modrou složku světla, tak i pro širokopásmovou složku. Dále se zkoumá jak se vzorek chová mezi jednotlivými teplotami jestli je zde pokles vlnové délky nebo naopak růst a v neposlední řadě se zkoumají parametry indexu podání barev a teploty chromatičnosti. Naměřené hodnoty jsou přehledně sepsány v tabulkách a grafech. Nakonec jsou naměřené hodnoty porovnávány mezi sebou spolu s ukázkou analýzy naměřených dat.

## Kapitola 2

# Zdroje záření

Zdroj záření je základním prvkem optoelektronického telekomunikačního spoje. V zásadě se může využít jakýkoliv světelný zdroj, ale v praxi se nejvíce používají LED a laserové diody v osvětlovacích prostorách pro jejich výhodné parametry.

Na zdroje záření v optických komunikacích jsou kladeny tyto požadavky

- vysoká účinnost konverze elektrické energie na světelnou energii
- vysoká životnost a spolehlivost
- jednoduchá modulace
- úzká spektrální čára
- vhodná vlnová délka z hlediska vedení světla optickým vláknem
- vysoká směrovost
- malé rozměry
- nízká cena

### 2.1 LED

LED (Light Emitting Diode) je jeden z hlavních polovodičových zdrojů světla. LED se skládá ze dvou polovodičů typu N (katoda, negativní vodivost) a typu P (anoda, pozitivní vodivost), kde na jejich rozhraní vzniká PN přechod. Na PN přechodu dochází k difúzi elektronů z polovodiče typu N do polovodiče typu P a difúzi volných děr z polovodiče typu P do polovodiče typu N. Na přechodu dochází k rekombinaci elektronů a děr.

Pokud je dioda zapojena v propustném směru (anoda - kladný pól zdroje, katoda - záporný pól zdroje), tak vzniká elektrické pole, které ovlivňuje vyprázdněná oblast a to ovlivňuje oblasti P

a N. Dochází ke zmenšování vyprázdněné oblasti a v obvodu bude procházet elektrický proud. V propustném směru se LED dominantně využívá ke generování světla. Dalším využitím, které není v praxi moc využíváno je pro usměrňování napětí. Druhým způsobem jak lze LED diodu zapojit je v závěrném směru (anoda - záporný pól zdroje, katoda - kladný pól zdroje). Elektronů z polovodiče typu P budou v tomto případě přitahovány k zápornému pólu zdroje a elektrony polovodiče typu N budou přitahovány ke kladnému pólu zdroje. Tímto jevem se vyprázdňovaná oblast zvětší a diodou neprochází elektrický proud. V závěrném směru se LED využívá ke stabilizaci napětí nebo jako fotodetektor.

U LED diod dochází k samovolné emisi. V samovolné emisi dochází k přechodu z vyššího energetického stavu  $E_2$  do stavu nižšího s energií  $E_1$ , při kterém atom (respektive molekula) vyzáří foton. Jednotlivé atomy při ní vyzařují nekoordinovaně, emitované fotony mají různou fázi a vznikající elektromagnetické záření je nekoherentní. [1]

Mezi typické rysy LED diod patří:

- nižší proudové hustoty
- využívání samovolné emise
- nekoherentní záření
- šířka spektrální čáry je širší ve srovnání s laserovou diodou

Mezi hlavní výhody LED patří:

- jednodušší výroba
- menší náklady
- vyšší spolehlivost
- menší teplotní závislost
- jednodušší řídicí obvody
- linearita

Mezi hlavní nevýhody LED diod oproti laserovým diodám patří:

- Menší výstupní optický výkon
- Menší šířka pásma

Vyzářené světlo (barva) je závislé na vlnové délce a materiálu ze kterého je LED dioda vyrobena. Pro generování bílého světla v LED je potřeba zkombinovat LED modré barvy spolu s luminoforem. Přehled jednotlivých barev jsou v tabulce 2.1.

Barva	Vlnová délka [nm]	Materiál
UV	350	AlGaIn
Modrá	470	AlGaInN
Zelená	540	AlGaInN
Zelená	550	GaP
Žlutá	600	AlGaInP
Oranžová	640	AlGaInP
Červená	700	AlGaAs
IR	870	GaAs
IR	1300	InGaAs

Tabulka 2.1: Přehled LED diod

## 2.2 Laser

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je koherentní zdroj světla. Koherentní zdroje světla jsou založeny na stimulované emisi. Stimulovaná emise je proces, při němž foton o určitých vlastnostech indukuje přechod elektronu na vyšší energetické hladině v látce do nižší energetické hladiny, přičemž je emitován foton se stejnými vlastnostmi (vlnová délka, směr, fáze a polarizace). Tyto fotony dále mohou stimulovat přechody dalších elektronů do nižších energetických hladin. Takto vzniklé fotony tvoří koherentní záření.

Nutné podmínky činnosti laserů:

- inverze populace
- stimulovaná emise
- kladná zpětná vazba
- dodávka energie

Základní podmínkou pro stimulovanou emisi je obsazení horních energetických hladin tzv. inverzi populace, té lze dosáhnout pomocí excitací (čerpáním) pomocí elektrického proudu nebo fotonů. Takové prostředí, které je obohacené o energii se nazývá aktivní prostředí. Aktivní prostředí dokáže zesílit světlo a říkáme, že dochází k zesílení světla stimulovanou emisí záření. Dále podmínkou pro inverzní populaci je, aby se používal tří nebo čtyřhladinový systém. U dvouhladinového systému má horní hladina krátkou životnost a díky tomu by se elektrony samovolně

rekombinovaly bez vygenerovaného fotonu s požadovanými vlastnostmi. Díky tomu že při inverzi populace je rychlost emise vyšší než rychlost absorpce není možné vytvořit stabilní inverzi populace, kdy elektrony v atomech obsazují vyšší energetické hladiny. V praxi se používá čtyřhladinové systémy [1].

Kladná zpětná vazba je tvořena zrcadly, představuje základní "kopírovací mechanismus" pro fotony. Jedno zrcadlo je plně odrazné a druhé polopropustné (rezonátor). U polovodičů jsou obvykle obě zrcadla polopropustné, kde jedno je optický výstup a druhé zrcadlo je pro monitorovací diodu. Tyto zrcadla odráží a kopírují fotony, které jsou rovnoběžné s optickou osou [1].

## 2.2.1 Vlastnosti laseru

Směrovost je u laserů velmi vysoká, charakterizuje se pomocí průměru paprsku. Díky tomu, že směrovost je vysoká, tak z toho plyne, že i ve velkých vzdálenostech je snadná fokusace.

Rozbíhavost laseru je nízká a světlo se šíří ve formě úzkého kuželu.

Jelikož lasery mají vysoký jas, tak je nebezpečí poškození oka a je potřeba podle toho i s laserem pracovat. Jas se poté počítá následovně:

$$L = \frac{P}{A \cdot \Omega} [W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}] \quad (2.1)$$

P je celoplošný výkon, A je plocha osvětlená paprskem a  $\Omega$  je rozbíhavost prostorového úhlu. Další vlastností laserových diod je, že mají velmi malou šířku spektrální čáry, obvykle hodnoty se pohybují mezi 1-2 nm, kde ty nejlepší lasery mají šířku kolem 0,01 nm. A jelikož je světlo koherentní, tak se zachovávají fázové vztahy mezi jednotlivými vlnami světla.

Aplikace laserových diod:

- optické komunikace
- měřicí technika
- medicína
- strojírenství
- analýza materiálu
- vojenská technika

## 2.2.2 Třídy laserů

### 2.2.2.1 Třída 1

Lasery, které jsou bezpečné za provozních podmínek, které lze předpokládat s dostatečně velkou pravděpodobností, včetně podmínek sledování svazku pomocí optických přístrojů [2].



#### **2.2.2.2 Třída 1M**

Lasery vyzařující v rozsahu vlnových délek od 302,5 nm do 4 000 nm, které jsou bezpečné za provozních podmínek, které lze předpokládat s dostatečně velkou pravděpodobností, ale mohou být nebezpečné, jestliže uživatel použije pro sledování uvnitř svazku optické přístroje [2].

#### **2.2.2.3 Třída 2**

Lasery vyzařující viditelné záření v rozsahu vlnových délek od 400 nm do 700 nm, u kterých je ochrana zraku za normálních okolností zajištěna fyziologickými reakcemi zahrnujícími i mrkací reflex. Tato reakce může být považována za dostatečnou pro zajištění adekvátní ochrany za provozních podmínek, které lze předpokládat s dostatečně velkou pravděpodobností, včetně použití optických přístrojů pro pozorování uvnitř svazku [2].

#### **2.2.2.4 Třída 2M**

Lasery vyzařující viditelné záření v rozsahu vlnových délek od 400 nm do 700 nm, u kterých je ochrana zraku za normálních okolností zajištěna fyziologickými reakcemi zahrnujícími i mrkací reflex. Ale sledování výstupu laseru může být daleko nebezpečnější, jestliže uživatel použije pro sledování uvnitř svazku optické přístroje [2].

#### **2.2.2.5 Třída 3R/3A**

Lasery vyzařující v rozsahu vlnových délek od 302,5 nm do 1060 nm, u kterých je přímé sledování uvnitř svazku potenciálně nebezpečné, ale riziko je menší než u laserů třídy 3B. Protože je riziko nižší, použije se méně požadavků na výrobce a opatření pro uživatele než pro třídu 3B. Přípustná mez záření (Allowable Exposure Limit) je pětinasobkem přípustné meze záření AEL pro třídu 2 v rozsahu vlnových délek od 400 nm do 700 nm a pětinasobkem přípustné meze záření AEL pro třídu 1 pro ostatní vlnové délky [2].

#### **2.2.2.6 Třída 3B**

Lasery, u kterých je za normálních okolností nebezpečné, jestliže dojde k přímému ozáření svazkem (ve jmenovité vzdálenosti s nebezpečím poškození zraku NOHD). Sledování difúzních odrazů je za běžných podmínek bezpečné [2].

#### **2.2.2.7 Třída 4**

Lasery, které jsou schopny produkovat nebezpečné difúzní odrazy. Mohou způsobit poškození pokožky a vznik požáru. Jejich používání vyžaduje mimořádnou pozornost [2].

## Kapitola 3

# Luminiscence

Luminiscence je jev, při kterém dochází k absorpci dodané energie a následné emisi energie. Tato dodaná energie excituje elektrony do vyšší energetické hladiny, kde elektron může zůstat různě dlouhou dobu. Čas, který elektron stráví ve vyšší energetické hladině má dopad na dobu doznívání záření. Přechod z vyšší energetické hladiny zpátky do původní energetické hladiny způsobí vyzáření fotonu. Lze také říci, že luminiscence je děj, při kterém záření o kratší vlnové délce vyvolá záření o delší vlnové délce. Luminiscence se dále dělí na fluorescenci a fosforescenci [6].

### 3.1 Fluorescence

Fluorescence je definována jako emise záření z excitovaného elektronového stavu jedním či více spontánními energetickými přechody. Tento jev se projeví prakticky ihned po započetí buzení a po jeho ukončení okamžitě vymizí (do  $10^{-8}$  s).

Jak již bylo zmíněno výše, fluorescence je jev, kde po ozáření světlem s vlnovou délkou  $\lambda_{excit}$  je jiné světlo s vlnovou délkou  $\lambda_{emit}$  a platí pravidlo, že  $\lambda_{emit} > \lambda_{excit}$ . Tento jev se stal základem ve fluorescenční mikroskopii [6].

Hlavní charakteristiky fluorescence jsou:

- intenzita – počet fotonů procházejících v daném směru jednotkovou plochou za jednotku času
- spektrální složení – spektrální hustota fotonového toku na jednotkový interval vlnových délek nebo frekvenci
- polarizace – směr kmitání elektrického vektoru elektromagnetické vlny
- doba dohasínání – je dána vnitřní dobou života excitovaného stavu z něhož dochází k emisi
- koherenční vlastnosti – vztahy mezi fázemi světelných vln

- emisní spektrum – závislost intenzity fluorescence na vlnové délce (nebo energii, vlnótu, frekvenci) při konstantní vlnové délce emitovaného záření.
- exitační spektrum – závislost intenzity fluorescence na vlnové délce při konstantní vlnové délce emitovaného záření.

## 3.2 Fosforescence

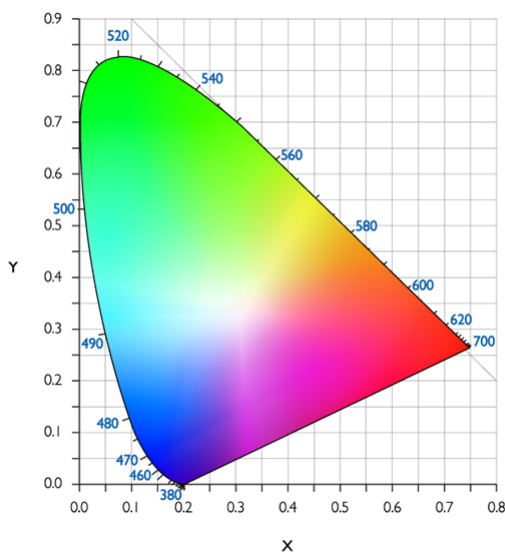
Uplatňuje-li se při emisi záření z excitovaného elektronového stavu metastabilní hladina, jedná se o fosforescenci. Mezi fosforescencí a fluorescencí je jediný rozdíl v době trvání záření. Doba trvání fosforescence je většinou delší než  $10^{-2}$  s až do řádů minut. Důvod proč fosforescence má delší dobu dohasínání je ten, že elektrony se dostanou do energetické hladiny ze které se nelze přímo vrátit do základní hladiny. V této metastabilní hladině elektrony zůstanou tak dlouho, dokud nevydají získanou energii pomocí vyzářeného fotonu [6].

## Kapitola 4

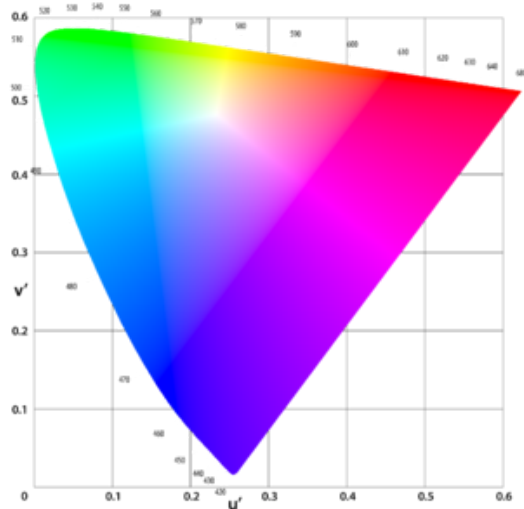
# Kolorimetrie

### 4.1 Diagram chromatičnosti

Existují dva typy chromatických souřadnic pro definování barev a tedy  $(x, y)$  a  $(u', v')$ , tyto souřadnice vyvinula mezinárodní komise pro osvětlování (commission internationale de l'éclairage, zkráceně CIE) v roce 1931  $(x, y)$  a 1976 vyvinula  $(u', v')$ . Diagram  $(x, y)$  je velmi prostorově nevyrovnaný co se týká barevných složek. Například pro stejné hodnoty zeleného světla by byly rozdíly v hodnotách mnohem menší než u modrého světla. Diagram  $(u', v')$  je více rovnoměrný a je spíše preferovaný pro zjišťování barevné chromatičnosti. Na obrázku 4.1 a 4.2 jde názorně vidět prostorové rozložení barev a rozdíly mezi oběma prostory [4], [5], [3].



Obrázek 4.1: Diagram chromatičnosti (x,y)



Obrázek 4.2: Diagram chromatičnosti (u',v')

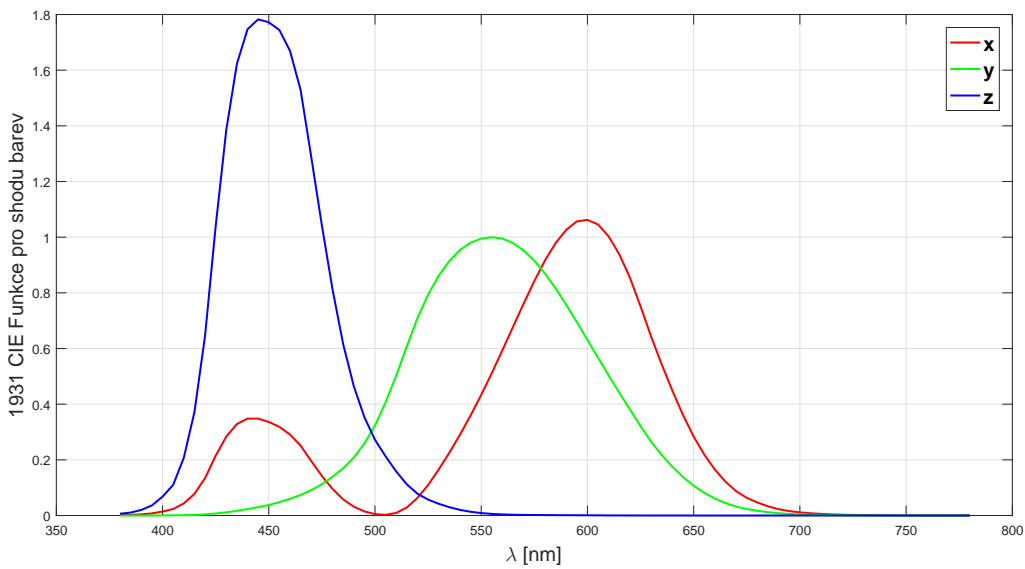
Pro výpočet trichromatických hodnot platí jsou vypočítány podle následujících rovnic.

$$X = \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad (4.1)$$

$$Y = \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad (4.2)$$

$$Z = \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad (4.3)$$

Funkce pro shodu barev  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  a  $\bar{z}(\lambda)$  byly dány v roce 1931 organizací CIE a odkazuje se na oční receptory, které jsou citlivé na červené, zelené a modré barvy. Graf těchto funkcí je na 4.3 [4]



Obrázek 4.3: CIE 1931 funkce pro shodu barev

Pomocí těchto funkcí je možné dopočítat souřadnice x a y na diagramu a určit pozici zdroje záření  $P(\lambda)$ .

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (4.4)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (4.5)$$

## 4.2 Teplota chromatičnosti

Elektromagnetické záření lze popsat i pomocí teploty chromatičnosti. V různých literaturách se může také objevit pojem barevná teplota, který je odvozen z anglického překladu Correlated Colour Temperature (CCT). CCT popisuje v barevném spektru jak pozorovatel vnímá především bílé

světlo. Světlo může být teplé a studené, pokud má světlo odstíny žluté nebo oranžové, tak se jedná o teplé světlo. Pokud má světlo modré odstíny, tak světlo má studenou barvu.

Teplota chromatičnosti  $T_c$  se dá vyjádřit jako světlo určité teploty chromatičnosti a má barvu tepelného záření vydávaného černým tělesem zahřátým na tuto teplotu. Teplota chromatičnosti se měří v Kelvinech.

Černé těleso je teoretický předmět, který absorbuje veškeré elektromagnetické záření, které na něj dopadá. Zdá se černé, protože neodráží světlo. Jakmile je ale černé těleso zahříváno, jeho barva se postupně změní z černé na červenou do bílé. O jako bílou barvu se jedná rozhoduje množství modrých složek [3].

### 4.3 Index podání barev

Index podání barev  $R_a$  (anglicky Colour rendering index CRI) je dalším důležitým parametrem světla, který je celosvětově uznáván. Index podání barev je procentuální zastoupení všech barev proti slunci. Sluneční světlo má index podání barev 100 Ra a všechny umělé světelné zdroje jsou porovnávány s touto hodnotou. Například 80 Ra znamená, že zdroj obsahuje 80% všech vlnových délek proti slunci. Index podání barev je bezrozměrné číslo, které může nabývat hodnot od 0 do 100, kde 100 je nejlepší výsledek. Prvním krokem při počítání je spočítat barevnou odlišnost  $\Delta E$  ze 14 vzorků referenčního a použitého zdroje záření. Prvních 8 vzorků jsou středně saturované barvy a posledních 6, které zahrnují i čtyři velmi saturované barvy (červená, žlutá, zelená a modrá), barvu pleť a listovou zeleň. Jednotlivé barevné vzorky jsou na 4.4 [3].



Obrázek 4.4: 14 testovacích barev pro výpočet  $R_a$

Jednotlivé hodnoty  $R_i$  pro každou z testovacích barev je dán rovnicí

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i \quad (i = 1, \dots, 14) \quad (4.6)$$

A celkový index podání barev je průměrem prvních 8 testovacích barev

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (4.7)$$

Výpočty jednotlivých  $R_i$  nejsou triviální, ale existují algoritmy, které to zvládají spočítat jednoduše. V této práci byl použit program Spectra Suite, který touto funkcí disponuje. Perfektní skóre podání barev je 100 (pokud nejsou žádné odlišnosti). Pokud je  $R_a > 80$ , tak jsou akceptovatelné pro osvětlení do vnitřních prostorů a pokud  $R_a > 90$ , tak je to považováno jako excelentní index podání barev.

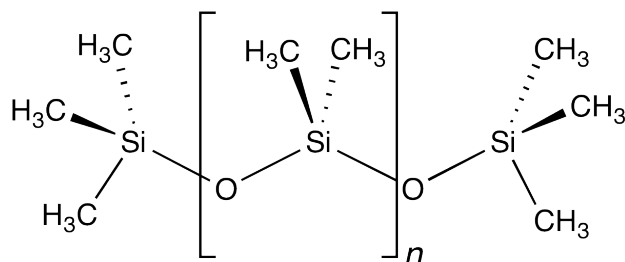
V běžném životě se s  $R_a$  lze potkat například na večerní ulici osvětlené veřejným osvětlením, v obchodě i v průmyslové výrobě [5].

## Kapitola 5

# Polydimethylsiloxan

Polydimethylsiloxan (PDMS) patří do organokřemičité sloučeniny, velmi často se nazývá silikonem. Polydimethylsiloxan je nehořlavý, netoxický, bez zápachu, chuti a díky své vysoké viskozitě téměř nerozpustný ve vodě. PDMS má velmi dobré teplotní odolnosti a velmi dobrou flexibilitou. Běžná teplotní použitelnost se pohybuje v rozmezí od  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  až po  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  [7], [8].

### 5.0.1 Chemické složení



Obrázek 5.1: Chemické složení PDMS [9]

PDMS obsahují v jedné molekule Si-O vazbu. Pevnost těchto molekul není vysoká, ale pro běžný tepelný rozsah se pevnost nemění. Polydimethylsiloxan je chemicky čistý materiál, který obsahuje velmi málo nečistot, to znamená, že to není vhodný materiál pro bakterie. Pro výrobu polydimethylsiloxanu se používá technický křemík a kyselina chlorovodíková s metanolem, to vytváří chlormetan. Výroba následně prochází syntézou, rektifikací, hydrolýzou a polykondenzací. Výsledné složení polydimethylsiloxanu je na obrázku 5.1.

Využití PDMS v praxi má velké spektrum v různých oborech. Například v elektronice, letectví, potravinovém průmyslu, lékařství a automobilovém průmyslu. Nevýhodou PDMS je nákladná výroba a složitá výroba. Mezi výhody patří hlavně teplotní stabilita.



## 5.1 Sylgard

Sylgard je dvousložkový zalévací a zapouzdřovací elastomer na bázi polydimethylsiloxanu doplněný o vytvrzovací činidlo. Teprve po přidání vytvrzovacího činidla lze PDMS vytvrdit. Existují různé varianty silikonových gelů, které mají různé vlastnosti a každý gel je použitý na něco jiného.

## 5.2 Sylgard 184

Sylgard 184 je čirý, středně viskózní, dvousložkový, která se ředí v poměru 10:1 a teplotní rozsah je od -55 °C až po 200 °C. Poté co kapalina je promíchána vzniká flexibilní elastomer, který je vhodný pro povrchové ochrany zařízení. Pokud je to možné, tak výroba polydimethylsiloxanu by měla být prováděna za sníženého tlaku. Hlavně pokud smíchaný elastomer má hodně vzduchových bublinek. Sylgard 184 je vytvrzován na vzduchu při běžné pokojové teplotě po dobu 24 hodin. Při pokojové teplotě je to zdoluhavý proces a tak se tento proces může urychlit zvýšením teploty prostředí až na převyšující 150 °C. Sylgard 184 už začíná tvrdnout už při míchání silikonu a činidla. Zpočátku se zvyšuje viskozita a následně gelovatěním a finální konverzí na pevný elastomer.

Sylgard 184 se může používat jako prostředek k ochraně desek plošných spojů, zesilovačů, konektorů nebo zdrojů proudu. Tento typ elastomeru je použit pro výrobu vzorků v praktické části této práce.

## 5.3 Sylgard 170

Tento typ sylgardu má hlavní vlastnost v tom, že je samozhášející a velice pružný i po vytvrzení, snadno opravitelný a velmi odolný. Narozdíl od Sylgardu 184 kde jsou obě složky průhledné, zde jsou jednotlivé složky barevně odlišeny nicméně teplotní rozsah je velmi podobný. Ten výrobce udává od -60 °C až po 200 °C. Vytvrzovací proces je zde velmi rychlý, kdy při teplotě 70 °C se vzorek vytvrdí za 15 minut, při teplotě 100 °C za 8 minut a při teplotě 150 °C za 3 minuty. Poměr mísení je zde 1:1. Sylgard 170 se využívá například v automobilovém průmyslu nebo k ochraně elektrických součástek jako jsou zdroje, relé apod.

## 5.4 Sylgard 517

Tento typ sylgardu se vyznačuje tím, že je nízkoviskózní dielektrický samozacelující gel, který má trvalou adhezi k materiálům. Je to čirý typ elastomeru, který se míchá v poměru 1:1 a teplotní rozsah má od -50 °C až do 200 °C. Díky tomu že má trvalou adhezi tak se používá pro zalévání optických kabelů nebo spojek v optoelektronice. Výrobce udává, že sylgard 517 se při 60 °C vytvrdí za 4 hodiny, při 100 °C za hodinu a při 150 °C za 15 minut.

## 5.5 Typické vlastnosti PDMS

Vlastnost	Sylgard 184
Viskozita základní složky [mPas]	5100
Viskozita po přidání vytvrzovacího činidla [mPas]	3500
Doba použitelnosti 25 °C [hod]	2
<b>Po vytvrzení</b>	
Odolnost vůči teplotnímu šoku (-55 °C - 155 °C)	10 cyklů
Tepelná vodivost [W/m.K]	0,16
Mez v pevnosti tahu [MPa]	6,2
Pevnost v roztržení [kN/m]	2,7
Bod lámavosti [°C]	< -70
Index lomu @589 nm	1,411
Index lomu @632 nm	1,422

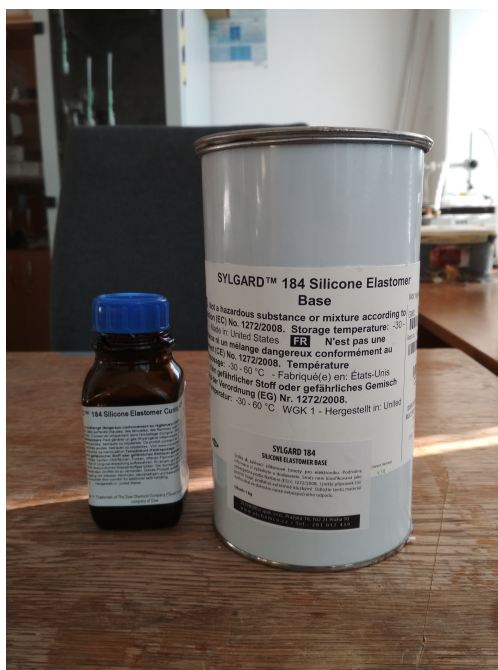
Tabulka 5.1: Typické vlastnosti PDMS [10], [?]

## Kapitola 6

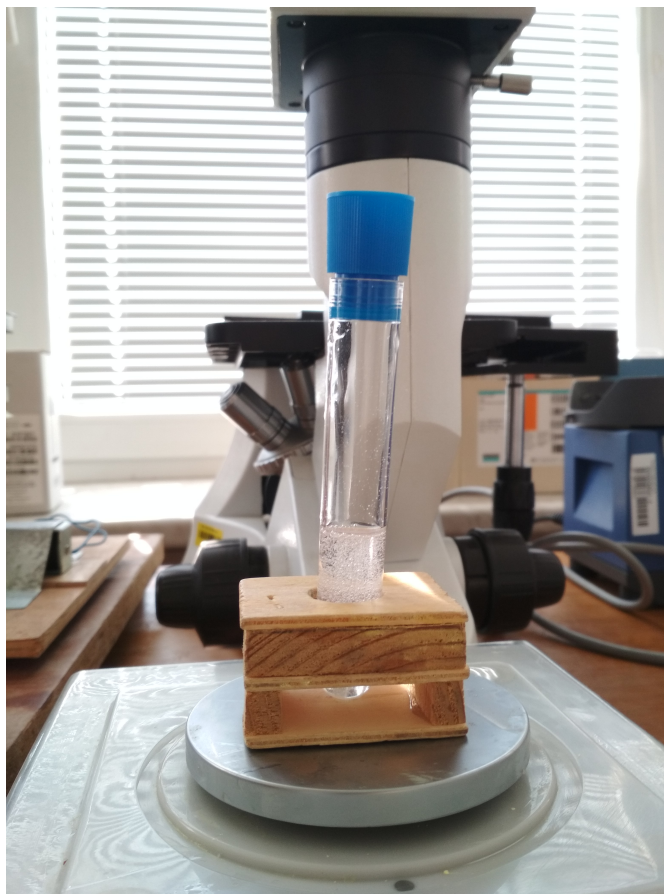
# Výroba vzorků

### 6.1 Příprava PDMS

Pro výrobu vzorků byl použit Sylgard 184. Polydimethylsiloxan se skládá z elastomeru a vytvrzovacího činidla, který jsem smíchal v poměru 10:1. Poměr 10:1 je pro PDMS nejčastější a zároveň je udáván výrobcem jako standard. Poté co je elastomer a činidlo pečlivě promícháno dohromady je potřeba, aby se vytvořené vzduchové bublinky odstranili. Pro to, aby se bublinky odstranily v co možná nejkratším čase je potřeba snížit celkovou teplotu vzorku na přibližně 0 °C až 5 °C.



Obrázek 6.1: Sylgard 184.



Obrázek 6.2: Smíchání elastomeru s činidlem.

## 6.2 Přidání luminoforu do PDMS vzorku

Následoval krok přidat vrstvu luminoforu do již připravených PDMS vzorků. Fosfor, který jsem využíval pro tuto práci má označení QMK58/F-U2. Je to žlutý fosfor, který se právě využívá ke generování bílého světla s pomocí modrého světla. Z důvodu bezpečnosti bylo třeba fosfor přidávat ve skleněném boxu, jelikož tento fosfor je toxický a vdechnutí takového fosforu by vést ke zdravotním problémům. V této práci jsem namíchal vzorky ve čtyřech různých poměrech (1:2, 1:50, 1:100 a 1:200).



Obrázek 6.3: Luminofor QMK58/F-U2

Dalším krokem bylo promíchat přidaný luminofor s PDMS. K tomu jsem využil laboratorní míchačku, která je právě určena k tomuto účelu. Každý vzorek bylo potřeba promíchat v ledničce minimálně 3 hodiny, aby se ve vzorku nenacházely hrudky fosforu a zároveň žádné vzduchové bubliny.



Obrázek 6.4: Proces přidávání luminoforu do PDMS ve skleněném boxu.



Obrázek 6.5: Laboratorní míchačka

Následně jsem již vzorek ze zkumavky přelil do přípravku s požadovaným tvarem a dal jsem vzorek zapéct do trouby na 45 minut při teplotě 65 °C.



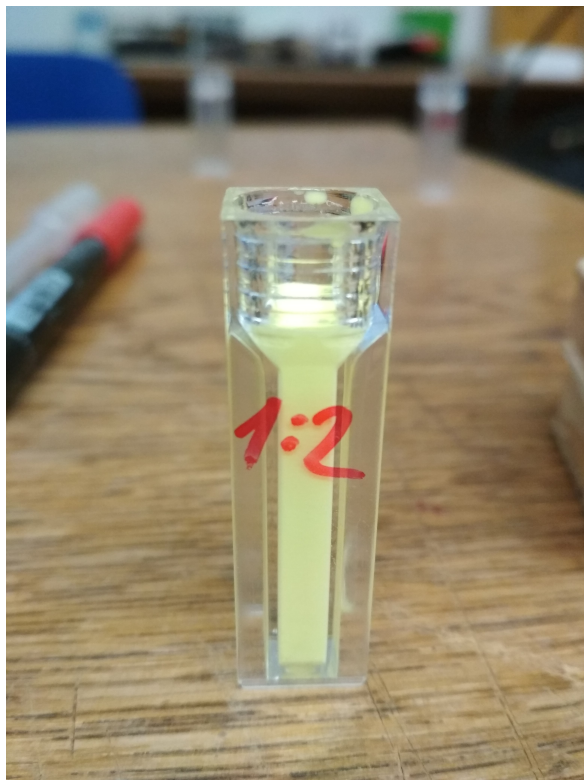


Obrázek 6.6: Výsledný promíchaný vzorek



Obrázek 6.7: Vzorek před zapékáním ve čtvercové formě

Výsledné vzorky po úpravě velikosti mají 1 cm na šířku a 2 cm na výšku.



Obrázek 6.8: Vzorek před zapékáním v obdélníkové formě



Obrázek 6.9: Finální vzorek po vyjmutí ze čtvercové formy

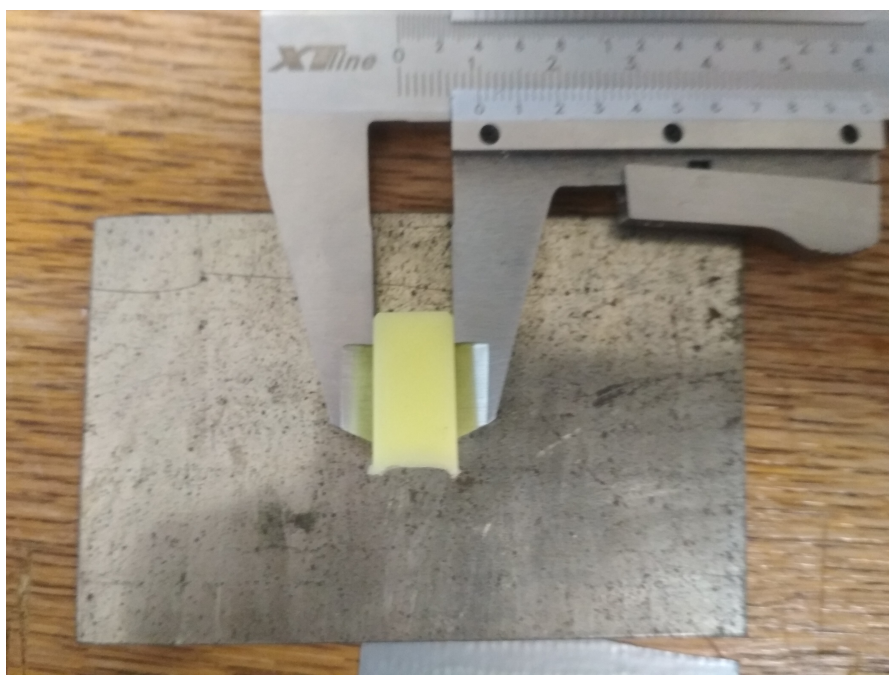




Obrázek 6.10: Finální vzorek po vyjmutí z obdélníkové formy



Obrázek 6.11: Finální vzorky upravené pro měření (zleva poměr 1:2, 1:50, 1:100 a 1:200)

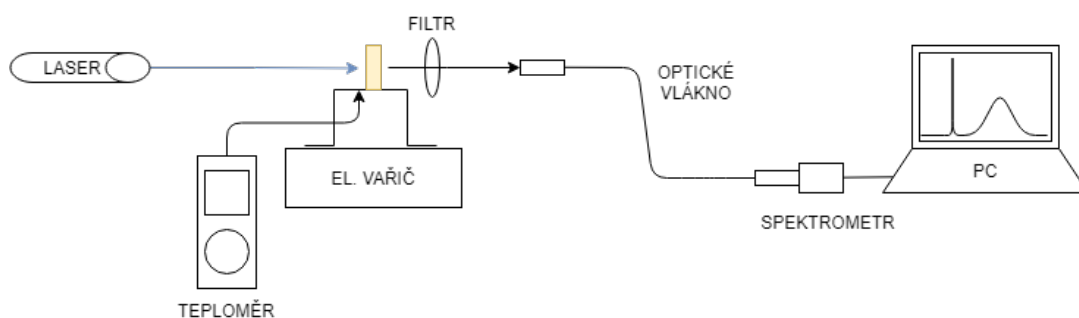


Obrázek 6.12: Šířka měřeného vzorku

## Kapitola 7

# Měřicí pracoviště

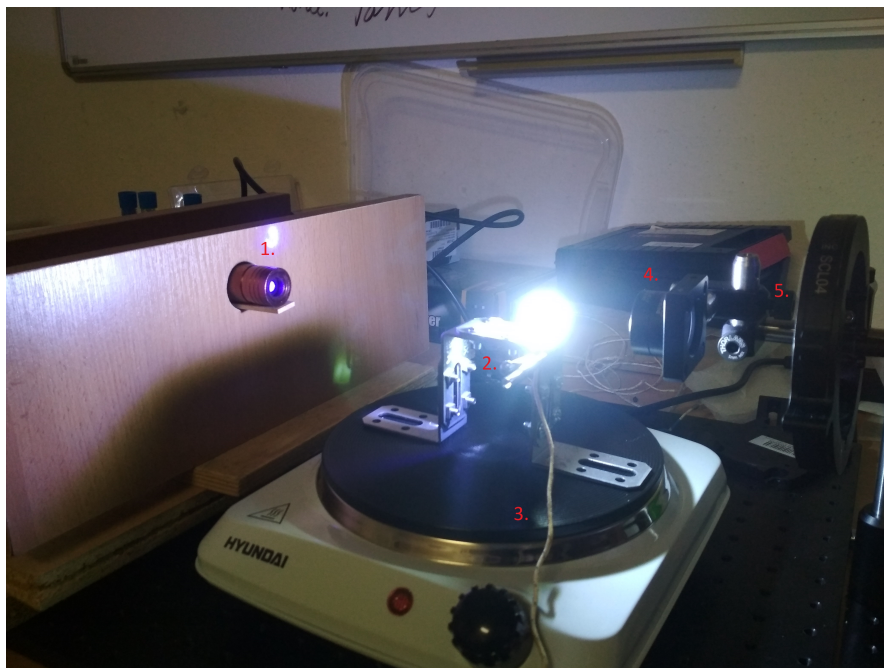
Měřicí soustava se skládala z výkonného modrého laseru, pomocných stabilizátorů od společnosti Thorlabs, filtru, optického vlákna, spektrometru od společnosti OceanOptics a softwaru Spectra Suite. Měřicí soustava byla sestavena tak, aby se manipulace omezila pouze na výměnu jednotlivých



Obrázek 7.1: Schéma měřicí soustavy

vzorků a výměnu baterek v laseru.

Číslem 1. je na obrázku 7.2 označen zdroj záření (LASER), číslem 2. je označený PDMS vzorek smíchaným s luminoforem, číslo 3. je elektrický vaříč pro regulování teploty vzorku, číslo 4. jsou optické filtry a číslo 5. je stabilizátor pro optické vlákno. Optické vlákno má výstup ve spektrometru, který je připojen k počítači a na počítači pomocí programu Spectra Suite jsou zpracovávány výsledky. Abych co nejvíce zamezil při měření rušivých vjemů (okolního světla) bylo potřeba použít zatemňovací box, který je na obrázku 7.3.



Obrázek 7.2: Měřicí soustava



Obrázek 7.3: Měřicí soustava se zatemňovacím boxem

## 7.1 Použité přístroje

### 7.1.1 Laser

Jako zdroj světla jsem použil modrý laser o  $\lambda = 450nm$  s maximálním výkonem  $5000mw$ . Tento laser se řadí do třídy III A a kvůli tomu bylo nutno používat ochranné brýle, které filtrovaly právě vlnovou délku 450 nm.



Obrázek 7.4: Laser 450 nm

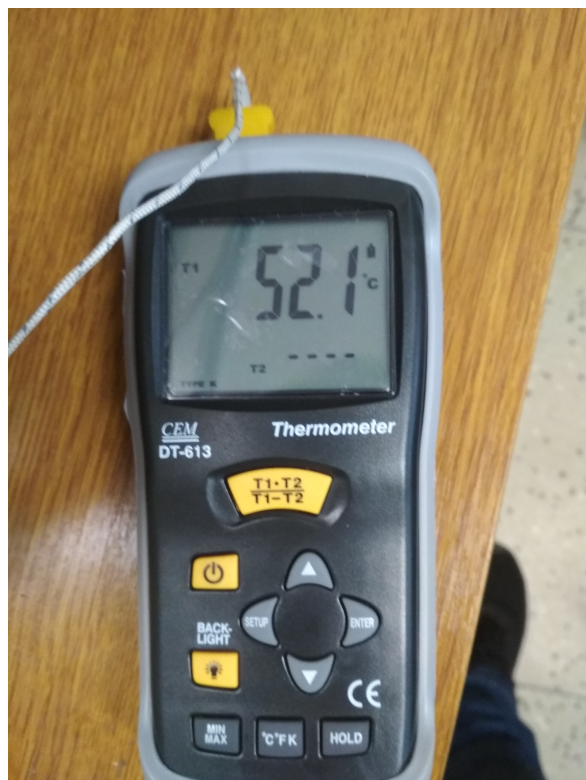
### 7.1.2 Elektrický vaříč

Jako zdroj generování tepla, jsem použil HYUNDAI jednoplotýnkový vaříč EP 110W s příkonem 1500 W a termostatem s plynulou regulací.

### 7.1.3 Teploměr

Teploměr byl zde použit pro snímání teploty při ohřívání nebo ochlazování vzorku.





Obrázek 7.5: Teploměr

<b>Všeobecné údaje</b>	
Rozměry (bez pouzdra)	165x76x43mm
Baterie	9V
Pracovní teplota	0 50°C
<b>Teplotní rozsah</b>	
Sonda typu K	-200 1372°C (-328 2501°F)
<b>Přesnost</b>	
T1, T2 nad -100°C (-148°F)	+/- 0,15% + 1°C/1,8°F
T1, T2 pod -100°C (-148°F)	+/- 0,5% + 2°C/3,6°F
T1-T2	+/- 0,5% + 1°C/1,8°F
Rozlišení displeje	0,1°C/°F/K < 1000°
	1°C/°F/K > 1000°

Tabulka 7.1: Technické parametry [13]

### 7.1.4 Filtry

Filtry jsem používal z důvodu snížení intenzity laseru, protože spektrum saturovalo a nešly vyčíst žádné výsledky. Použil jsem filtr DG 10-220-MD a DG 10-600-MD od společnosti Thorlabs.



Obrázek 7.6: DG 10-220-MD a DG 10-600-MD

Tolerance průměru	+0.00/-0.25 mm
Tloušťka	2.00 mm
Tolerance tloušťky	$\pm 0.2$ mm
Čistá clona	>90%
Rovinnost povrchu hladké strany (@633 nm)	<4 $\lambda$
Kvalita povrchu hladké strany	80-50 Scratch-Dig
Rovnoběžnost	<3 arcmin

Tabulka 7.2: Parametry pro DG 10-220-MD a DG 10-600-MD

### 7.1.5 Spektrometr

K práci byl použit spektrometr USB4000 od Ocean Optics. Na vstup je přiveden optický kabel a pomocí USB portu je propojen s počítačem a v programu Spectra Suite je naměřené spektrum. USB4000 dokáže měřit  $\lambda$  v rozmezí 200 až 1100 nm, optický konektor je zde typu SMA a integrační čas se může nastavit v rozmezí 3.8 ms až 10 vteřin.

Spectra Suite je software pro spektrometry a různé další zařízení od firmy Ocean Optics. Tento

program v této práci byl využit na měření spekter vzorků v módu pro počítání barev (barevná chromatičnost a index podání barev) [12].



Obrázek 7.7: USB4000



## Kapitola 8

### Měření

V této práci měření bylo rozděleno do čtyř částí, kde v každé části jsem měřený vzorek různě teplotně namáhal.

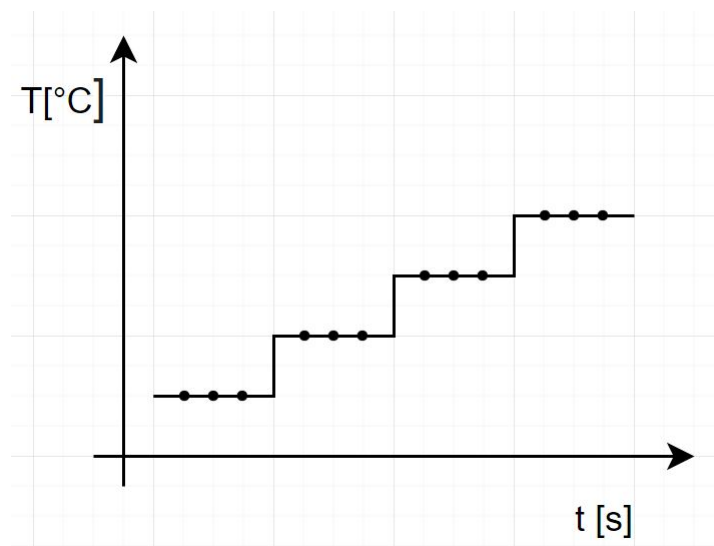
V první části jsem vzorek teplotně namáhal od 25 °C do 80 °C s intervalem 5 °C. Každých 5 °C jsem provedl měření. Na obrázku 8.1 je tento typ měření graficky znázorněn.

V druhé části jsem vzorek teplotně namáhal od 25 °C do 80 °C s intervalem 5 °C a následně jsem pozvolna snižoval teplotu vzorku po 5 °C a sledoval jestli se neobjeví rozdíly. Na obrázku 8.2 je tento typ měření graficky znázorněn.

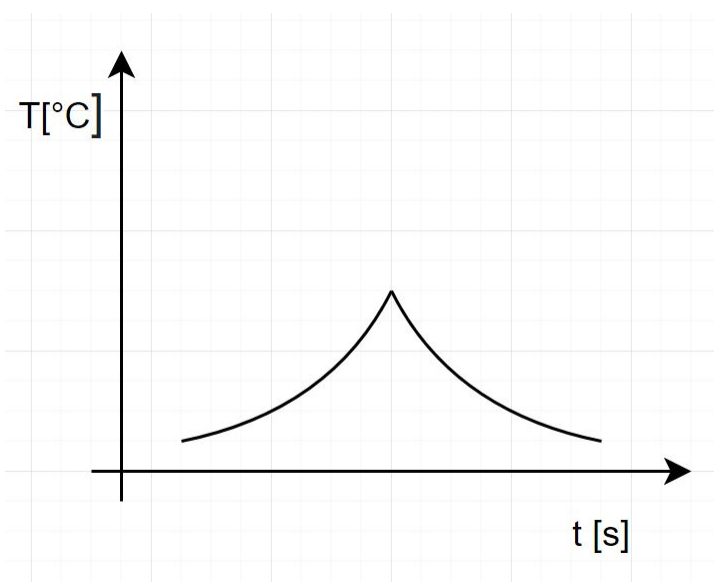
Třetí část měření byla velmi podobná druhé části s tím rozdílem, že po té co vzorek dosáhl teploty 80 °C, tak jsem daný vzorek prudce ochladil na počátečních 25 °C a měření zopakoval. Na obrázku 8.3 je tento typ měření graficky znázorněn.

V posledním typem měření bylo za úkol vzorek teplotně namáhat stejně jak v předchozích měření s tím rozdílem, že namáhaný vzorek se nechal být po dobu přibližně 5 hodin a následně se měření zopakovalo. Na obrázku 8.4 je tento typ měření graficky znázorněn.

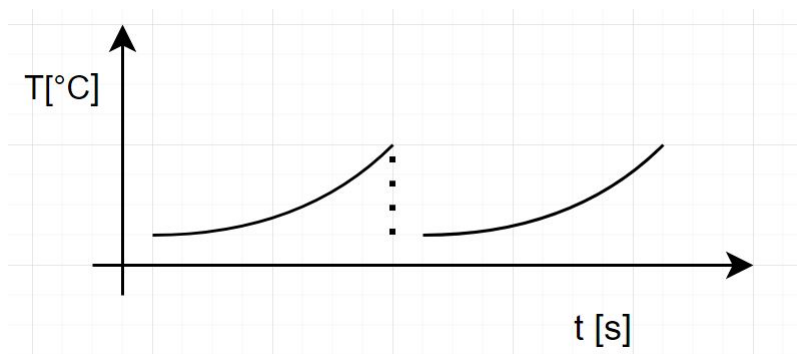
V každém v tomto měření jsem měřil Index podání barev, teplotu chromatičnosti a z naměřeného spektra mě zejména zajímaly maximální hodnoty vlnových délek a amplituda dané vlnové délky obou laloků bílého světla. Každý graf obsahuje naměřené hodnoty ve formě jednotlivých bodů a regresivní křivku polynomem čtvrtého řádu, pro lepší porozumnění chování měřeného vzorku. Všechny hodnoty v grafech a tabulkách jsou vypočítány z průměru nasbíraných hodnot při každém měření. V jednom měření jsem nasbíral vždy 10 hodnot pro každou měřenou veličinu. Dále je vhodné zmínit, že pro každý typ měření jsou použil jiný vzorek. To znamená, že v celé této práci bylo použito 16 různých vzorků (4 vzorky na jeden poměr).



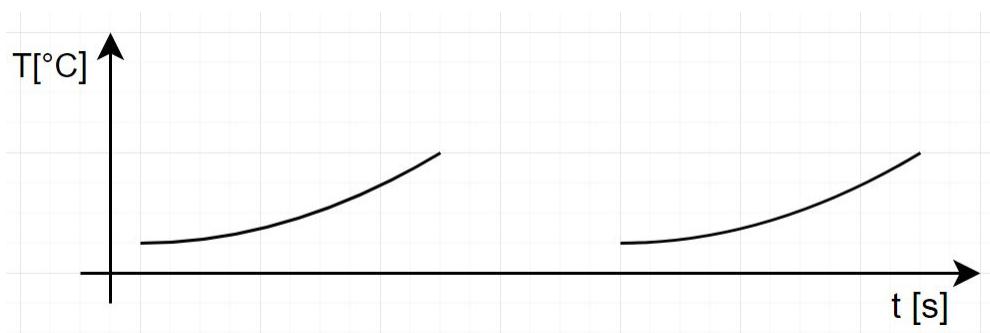
Obrázek 8.1: Postupné zvyšování teploty



Obrázek 8.2: Pozvolné ochlazování vzorku



Obrázek 8.3: Prudké ochlazení



Obrázek 8.4: Měření po určité době

## 8.1 Vzorek s koncentrací luminoforu 1:2

### 8.1.1 Postupné zvyšování teploty

Z naměřených výsledků lze vidět, že při teplotě 25 °C byla naměřena nejmenší hodnota Ra **70,57** při teplotě 45 °C byla naměřena nejvyšší hodnota Ra **95,44**. Jak lze vidět na grafu 8.5 a v tabulce 8.1, tak po prvním teplotním namáhání z 25 °C na 30 °C se hodnoty indexu podání barev ustálily kolem 93 Ra.

Teplota chromatičnosti má opačný trend než index podání barev. Na začátku měření byla teplota chromatičnosti na hodnotě **37114,17K** a následně hodnoty rapidně klesly na hodnoty kolem **5000K** a to je také graficky znázorněno na obrázku 8.6 a v tabulce 8.1.

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	70,57	36149
30	71,4	37114,17
35	94,41	5265,5
40	95,86	5537,2
45	95,44	5526
50	93,16	5874,4
55	94,43	4836,5
60	88,63	6259,3
65	94,04	4904,5
70	93,08	5360,2
75	93,67	5450,6
80	94,81	5504,4

Tabulka 8.1: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	32953,87	445,23	1916,9	558,19
30	47844,65	447,56	1943,52	568,55
35	36922,83	447,98	1658,85	578,7
40	9312,11	445,23	1495	570,38
45	33226	448,19	1908	581,13
50	4175	443,96	1386,47	553,27
55	35735	448,19	1986	567,13
60	12971	446,71	1675,27	573,83
65	41061,77	448,19	1865,7	576,67
70	37320	448,19	1978,34	567,33
75	22482,6	448,4	1800	554,43
80	26832,49	448,62	1611,75	569,16
<b>Průměr</b>	<b>28403,11</b>	<b>447,2042</b>	<b>1768,817</b>	<b>568,2308</b>

Tabulka 8.2: Maximální naměřené hodnoty ve spektru

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	2,33	2,33	10,36	10,36
35	2,75	0,42	20,51	10,15
40	0	-2,75	12,19	-8,32
45	2,96	2,96	22,94	10,75
50	-1,27	-4,23	-4,92	-27,86
55	2,96	4,23	8,94	13,86
60	1,48	-1,48	15,64	6,7
65	2,96	1,48	18,48	2,84
70	2,96	0	9,14	-9,34
75	3,17	0,21	-3,76	-12,9
80	3,39	0,22	10,97	14,73

Tabulka 8.3: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek

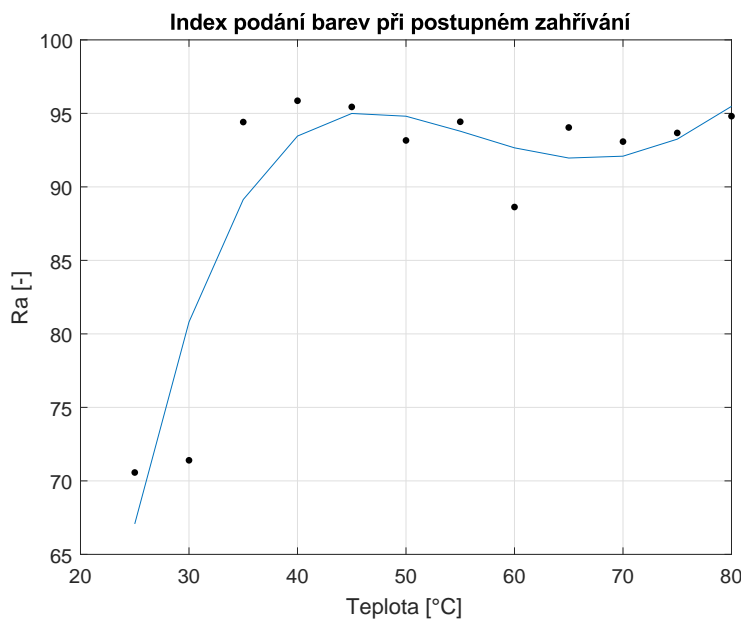
kde,

$\Delta_{25}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 25 °C

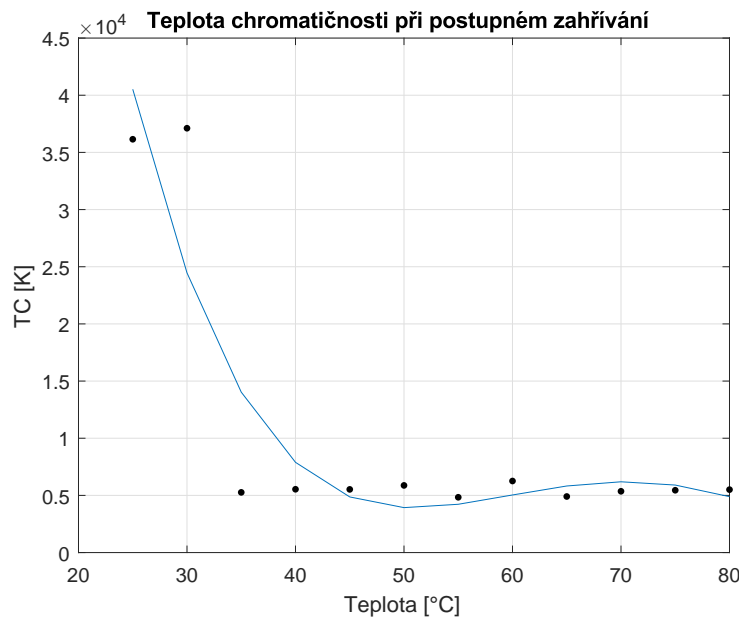
$\Delta_{předchozí}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě

V tabulce 8.2 jsou znázorněny maximální naměřené hodnoty vlnové délky a intenzity jak pro modré světlo, tak i pro širokopásmové světlo. Z tabulky 8.2 jde vyčíst, že průměrná vlnová délka je **447,2042 nm** pro modré světlo a **568,2308 nm** pro širokopásmové světlo. Z tabulky 8.3 lze zjistit, že průměrná změna vlnové délky vůči 25 °C je **2,15 nm** a zároveň průměrná změna vůči předchozí teplotě je **0,31 nm** pro modré světlo. Pro širokopásmové světlo je průměrná změna vlnové délky

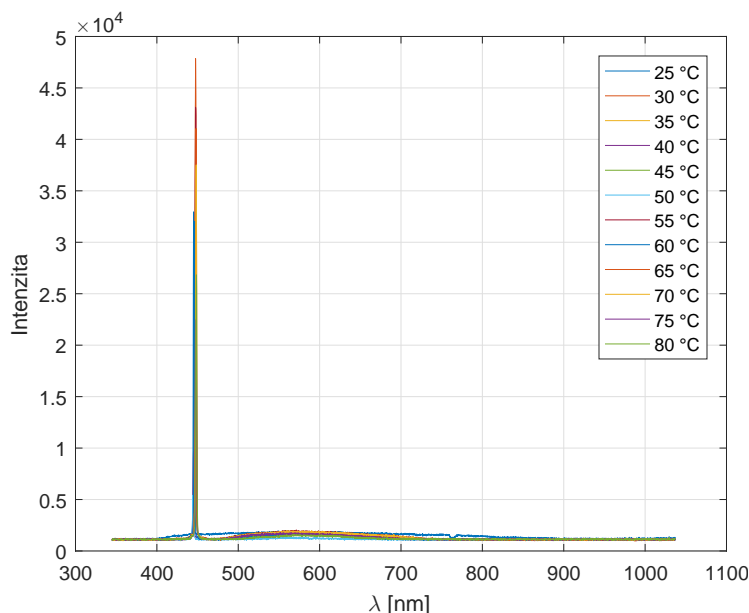
vůči 25 °C **10,95 nm** a zároveň průměrná změna vůči předchozí teplotě je **1 nm**. Tyto hodnoty lze vidět v tabulce 8.3. Integrační čas byl automaticky nastaven programem na hodnotu **7697  $\mu s$** .



Obrázek 8.5: Index podání barev při postupném zahřívání



Obrázek 8.6: Teplota chromatičnosti při postupném zahřívání



Obrázek 8.7: Spektrální charakteristika měření zvyšování teploty

### 8.1.2 Pozvolné ochlazování

Z naměřených výsledků teploty chromatičnosti a indexu podání barev lze vyčíst, že nejmenší index podání barev při zahřívání vzorku byl naměřený při teplotě 50 °C s hodnotou **70,92** a při ochlazení byl nejmenší index podání barev naměřený při 30 °C s hodnotou **67,24**. Nejvyšší  $R_a$  při zahřívání byl naměřen při teplotě 80 °C s hodnotou **89,9375** a při ochlazení nejvyšší hodnota byla naměřena při teplotě 50 °C s hodnotou **89,02**. Na grafech 8.8 a 8.10 jsou tyto naměřené hodnoty graficky znázorněny. Průměrný index podání barev při zahřívání je **79,17** a při ochlazení **78,85**.

Nejmenší naměřená hodnota teploty chromatičnosti při zahřívání vzorku byla při 55 °C s hodnotou **5033,6 K** a nejvyšší při teplotě 45 °C s hodnotou **22589,8 K**. Při ochlazení byly tyto hodnoty podobné kdy nejmenší hodnota byla naměřena při 50 °C s hodnotou **5214,8 K** a nejvyšší naměřená hodnota byla při 30 °C s hodnotou **24356 K**. Průměrná hodnota teploty chromatičnosti při zahřívání je **10892,8 K** a při ochlazení **11457,2 K**. Grafy tohoto měření jsou na 8.9 a 8.11.

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	83,63	7877,6
30	71,83	18387,11
35	80,06	8063,5
40	82,31667	10476
45	70,92	22589,8
50	70,93333	17490,36
55	74,51	5033,6
60	83,02222	5178,556
65	78	10223
70	77,9375	11731
75	86,9	6716,333
80	89,9375	6947,125

Tabulka 8.4: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při zahřívání vzorku

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
75	79,875	15744,25
70	79,14286	10148,33
65	72,6	13023
60	83,45	8953,75
55	81,3	5376
50	89,01333	5214,8
45	81,65	5298,9
40	81,51667	8236
35	80,3125	8674,125
30	67,24	24356
25	71,25	21004,22

Tabulka 8.5: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při ochlazování vzorku

V tabulce 8.6 jsou hodnoty intenzity a  $\lambda$  při maximální naměřené hodnotě pro zahřívání a v tabulce 8.7 pro ochlazování. Průměrná hodnota intenzity je **37898,52** a průměrná  $\lambda$  je **445,9892 nm** pro modré světlo při zahřívání vzorku. Pro širokopásmové světlo průměrná intenzita činí 1564,541 a  $\lambda$  je **569,4833 nm**.

Při ochlazování vzorku průměrná hodnota intenzity pro modré světlo je **60916,36** a  $\lambda$  je **447,0955 nm**. Pro širokopásmové světlo je průměrná intenzita **1715,775** a  $\lambda$  je **567,07 nm**. V průměru hodnoty  $\lambda$  u modrého světla při zahřívání jsou o **1,1 nm** menší. U širokopásmového světla při zahřívání jsou hodnoty průměrně o **2,4 nm** vyšší. Integrační čas byl automaticky nastaven programem na hodnotu **13225  $\mu$ s**.



Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	11353,94	444,81	1464	570,59
30	23950,99	444,81	1515	566,72
35	65535	446,29	1677	569,16
40	65535	446,29	1669,09	566,11
45	65535	447,35	1722	573,43
50	34962,92	445,44	1574	564,08
55	65535	448,4	1689,57	569,37
60	10407,78	444,81	1464	567,13
65	59606,13	447,98	1652,7	570,18
70	22593,19	444,81	1431,53	572,82
75	23996,05	446,5	1564,6	568,35
80	5771,18	444,38	1351	575,86
<b>Průměr</b>	<b>37898,52</b>	<b>445,9892</b>	<b>1564,541</b>	<b>569,4833</b>

Tabulka 8.6: Maximální naměřené hodnoty ve spektru při zahřívání

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
75	65535	447,56	1959,9	564,08
70	65535	447,13	1953,76	561,02
65	62301	445,86	1861,6	567,3
60	33756,67	445,02	1724	567,54
55	62891,07	447,98	1665	568,96
50	55067	447,56	1484,78	568,96
45	65535	447,98	1609,7	570,59
40	65535	446,08	1570,79	566,72
35	62854,21	447,98	1726	567,33
30	65535	447,13	1615	567,33
25	65535	447,77	1703	567,94
<b>Průměr</b>	<b>60916,36</b>	<b>447,0955</b>	<b>1715,775</b>	<b>567,07</b>

Tabulka 8.7: Maximální naměřené hodnoty ve spektru při ochlazování

kde,  $\Delta_{25}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 25 °C

$\Delta_{\text{předchozí}}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě

kde,  $\Delta_{75}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 75 °C

$\Delta_{\text{předchozí}}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě

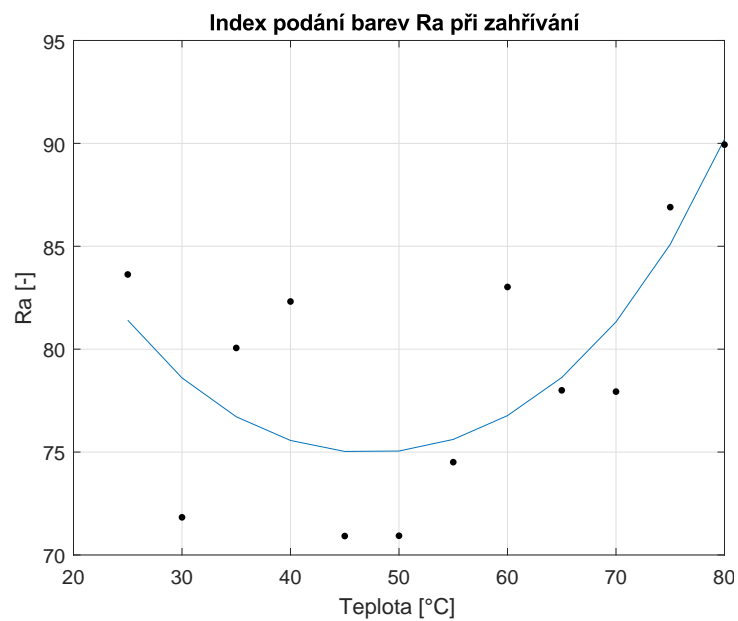
Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	0	0	-3,87	-3,87
35	1,48	1,48	-1,43	2,44
40	1,48	0	-4,48	-3,05
45	2,54	1,06	2,84	7,32
50	0,63	-1,91	-6,51	-9,35
55	3,59	2,96	-1,22	5,29
60	0	-3,59	-3,46	-2,24
65	3,17	3,17	-0,41	3,05
70	0	-3,17	2,23	2,64
75	1,69	1,69	-2,24	-4,47
80	-0,43	-2,12	5,27	7,51

Tabulka 8.8: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek při zahřívání

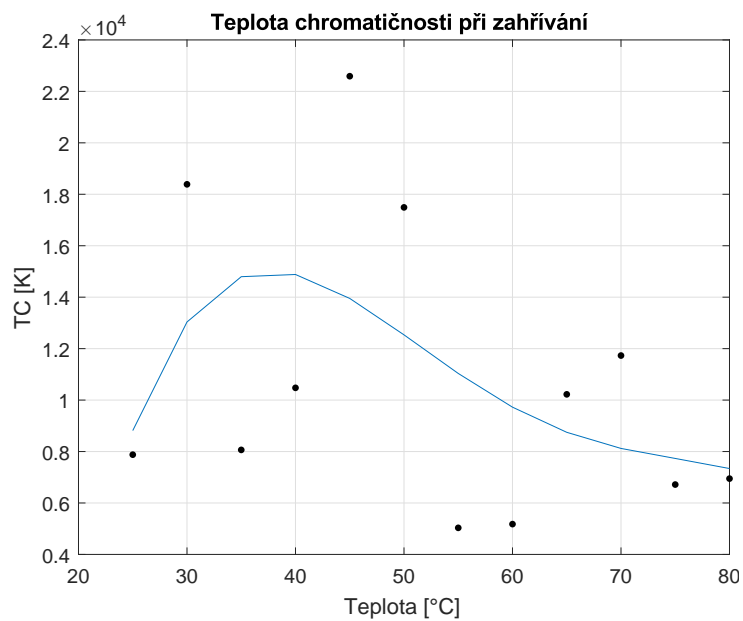
Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{75}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{75}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
75	0	0	0	0
70	-0,43	-0,43	-3,06	-3,06
65	-1,7	-1,27	3,22	6,28
60	-2,54	-0,84	3,46	0,24
55	0,42	2,96	4,88	1,42
50	0	-0,42	4,88	0
45	0,42	0,42	6,51	1,63
40	-1,48	-1,9	2,64	-3,87
35	0,42	1,9	3,25	0,61
30	-0,43	-0,85	3,25	0
25	0,21	0,64	3,86	0,61

Tabulka 8.9: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek při ochlazování

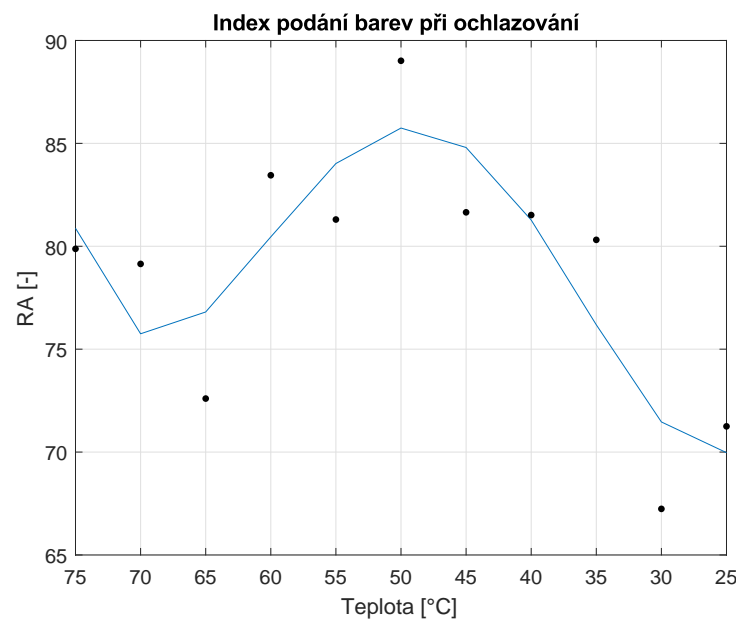
V porovnání nejvyšších hodnot vlnových délek s 25 °C při zahřívání nejvyšší rozdíl byl při teplotě 50 °C kde peak hodnota byla menší o **6,51 nm** a nejvyšší rozdíl mezi jednotlivými teplotami byl mezi teplotou 45 °C a 50 °C kde na 50 °C byla peak hodnota o **9,35 nm** menší v širokopásmovém světle. U ochlazování byl taktéž nejvyšší rozdíl v maximální naměřené hodnotě o **6,51 nm** při teplotě 45 °C v porovnání s 75 °C (počáteční hodnota při ochlazování). V porovnání mezi jednotlivými teplotami byl nejvyšší rozdíl mezi 70 °C a 65 °C kde při 65 °C byla peak hodnota o **6,28 nm** vyšší než u 70 °C.



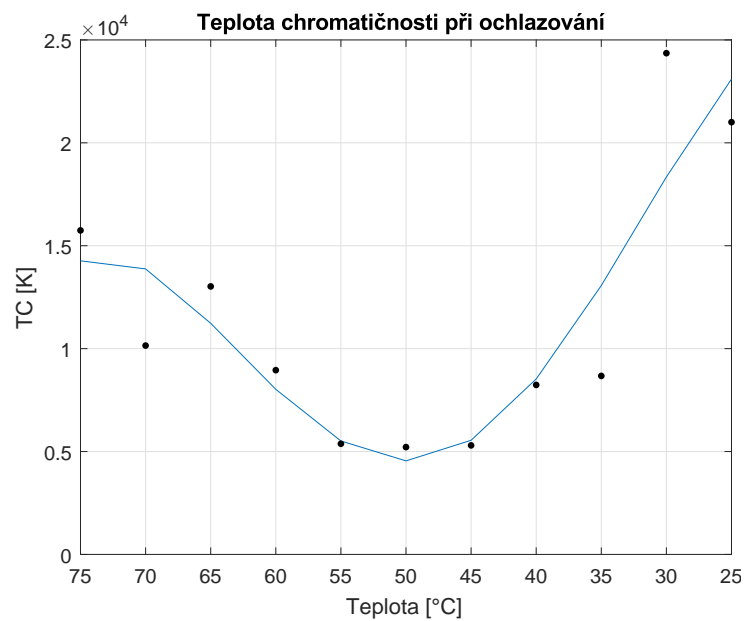
Obrázek 8.8: Index podání barev při zahřívání



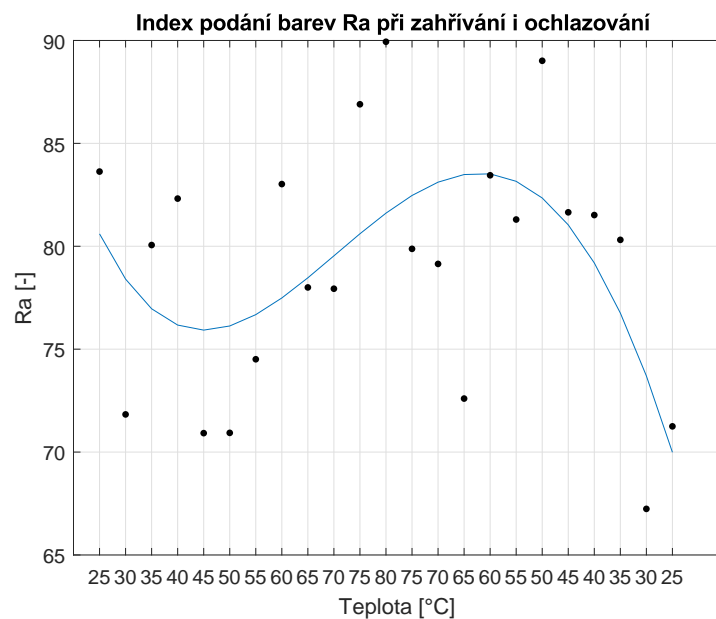
Obrázek 8.9: Teplota chromatičnosti při zahřívání



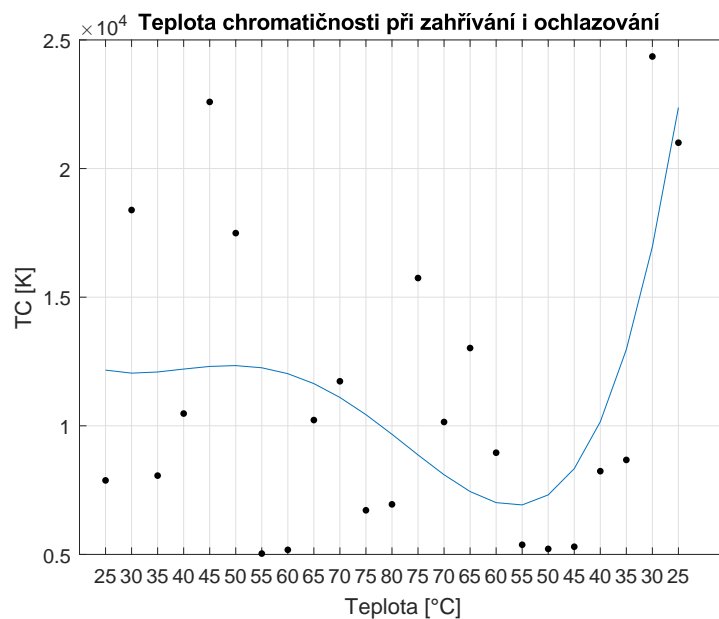
Obrázek 8.10: Index podání barev při ochlazování



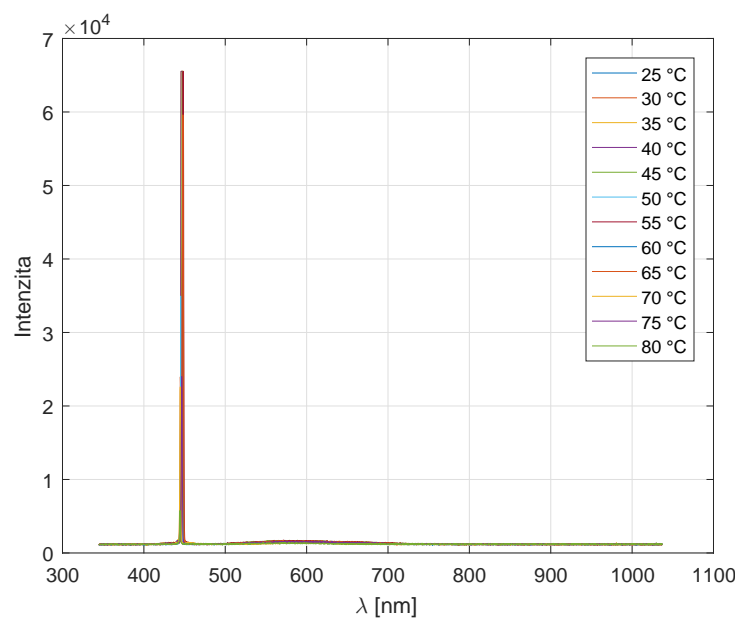
Obrázek 8.11: Teplota chromatičnosti při ochlazování



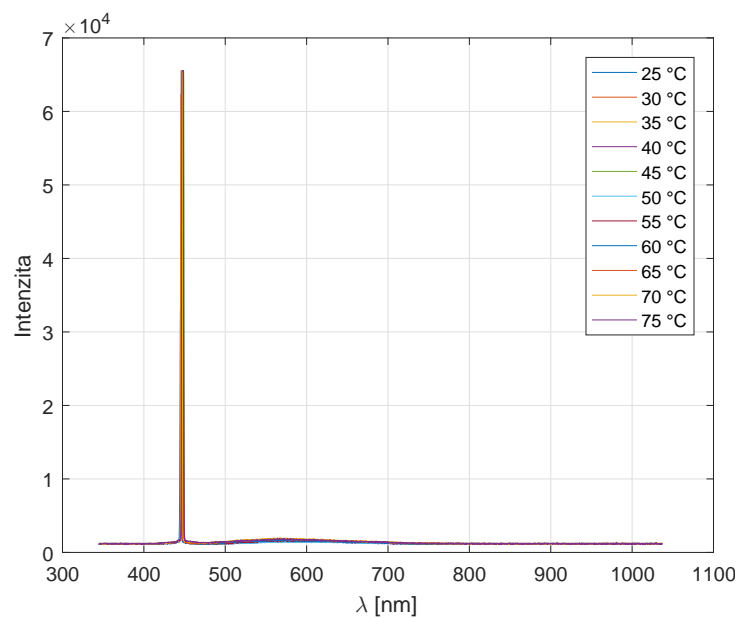
Obrázek 8.12: Index podání barev při zahřívání i ochlazování



Obrázek 8.13: Teplota chromatičnosti barev při zahřívání i ochlazování



Obrázek 8.14: Spektrální charakteristika měření pozvolného ochlazování při zahřívání vzorku



Obrázek 8.15: Spektrální charakteristika měření pozvolného ochlazování při ochlazování vzorku

### 8.1.3 Prudké ochlazení

V tabulce 8.10 jsou naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti před prudkým ochlazením. Index podání barev při zahřívání se pohyboval průměrně na hodnotě **74,15**. Nejvyšší hodnota byla naměřena na 75 °C s hodnotou **80,45** a nejmenší na 25 °C s hodnotou **63,44**. V tomto případě při zvyšující se teplotě se index podání barev zvyšoval. V grafu 8.16 jsou graficky znázorněny tyto naměřené hodnoty. Index podání barev po prudkém ochlazení se razantně neodlišuje od hodnot před ochlazením. Průměrná naměřená hodnota po ochlazení je **76,79**. To znamená, že se Ra navýšilo v průměru o **2,6**. V grafu 8.18 je graficky znázorněna křivka průběhu indexu podání barev po ochlazení. Z grafu lze vidět, že do 40 °C naměřené hodnoty kmitají v rozmezí od 69 do 79 Ra a od teploty 45 °C je graf rostoucí.

Teplota chromatičnosti před prudkým ochlazením se průměrně pohybovala na hodnotě **7337,7K**. Jediný razantní nárůst Tc byl naměřen na teplotě 50 °C, kde hodnota vystoupala až na hodnotu **26 028K** nicméně hned v následující teplotě Tc ihned kleslo na **4197,7K**. Na obrázku 8.17 jsou graficky znázorněny tyto naměřené hodnoty. V tabulce 8.11 a na obrázku 8.19 lze vidět naměřené hodnoty teploty chromatičnosti po prudkém ochlazení vzorku. Průměrná teplota chromatičnosti je **7365,774K**. Na 25 °C Tc má **12666,4K** a hned poté Tc klesne na **4280,6K**. Další takový nárůst je až ze 70 °C na 75 °C kde Tc vzroste o **9055K**.

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	63,44	3879,2
30	75,41	6278,8
35	75,49	6125,6
40	68,23	4583,9
45	77,75	6820,8
50	74,69	26028,8
55	67,51	4197,7
60	78,36	7659,9
65	70,3	4369,2
70	80,01	5807
75	80,45	6293,2
80	78,18	6008,7

Tabulka 8.10: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti před ochlazením

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	77,98	12666,4
30	69,52	4280,6
35	78,52	6392,2
40	70,93684	4379,211
45	79,24375	6526,563
50	79,62222	7745,222
55	74,575	5081,417
60	78,4	6099,154
65	79,8	7291
70	76,14	5547,556
75	76,82222	14603,5
80	80,00769	7776,462

Tabulka 8.11: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti po ochlazení

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	65535	446,5	15646,48	568,76
30	65535	448,4	12429,12	568,35
35	65535	447,98	13201,21	564,89
40	65535	447,13	16516,87	567,13
45	65535	447,56	7985,03	564,28
50	65535	447,77	6799,26	567,54
55	65535	447,13	20520,65	568,15
60	65535	447,13	10792,8	567,13
65	65535	446,5	11032,41	569,37
70	65535	447,98	7698,31	566,72
75	65535	445,02	6490,01	567,54
80	65535	447,77	7794,57	568,55
<b>Průměr</b>	<b>65535</b>	<b>447,2392</b>	<b>11408,89</b>	<b>567,3675</b>

Tabulka 8.12: Maximální naměřené hodnoty ve spektru před ochlazením

V tabulkách 8.12 a 8.13 lze vidět, že naměřená intenzita modrého světla v obou případech byla **65535**. Tato hodnota je maximální co spektrometr dokázal vyhodnotit, tudíž spektrum v modré složce saturovalo (spektrum na obrázku 8.22 a 8.23), to bylo způsobeno výkonným použitým laserem. Protože světlo bylo saturované, tak nejvyšší hodnoty jsou velmi podobné a v průměru je nejvyšší hodnota modrého světla před ochlazením vzorku  $\lambda = 447,2392 \text{ nm}$ . V širokopásmovém světle spektrum již není saturováno a maximální intenzita **20520,65** je naměřena na 55 °C. Průměrná vlnová délka širokopásmového světla před ochlazením je  $\lambda = 567,3675 \text{ nm}$ . Průměrná nejvyšší vlnová délka po ochlazení v modrém světle je  $\lambda = 446,7108 \text{ nm}$  a v širokopásmovém světle je  $\lambda = 568,8417 \text{ nm}$ .



Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	65535	446,92	14495,52	569,98
30	65535	447,77	12207,94	566,93
35	65535	447,35	11923,27	568,35
40	65535	446,5	11835,21	567,13
45	65535	446,29	11693,9	569,16
50	65535	447,13	10076,01	567,54
55	65535	445,86	8957,82	567,13
60	65535	445,44	7190,42	567,54
65	65535	447,13	8324,99	568,96
70	65535	447,35	8327,04	567,94
75	65535	447,77	5351,34	573,43
80	65535	445,02	5660,59	572,01
<b>Průměr</b>	<b>65535</b>	<b>446,7108</b>	<b>9670,338</b>	<b>568,8417</b>

Tabulka 8.13: Maximální naměřené hodnoty ve spektru po ochlazením

V tabulce 8.14 jde vidět, že pro modré světlo před ochlazením se vlnová délka  $\lambda$  liší maximálně o **1,9 nm** vůči 25 °C a mezi jednotlivými teplotami se maximálně liší o **2,96 nm**. V širokopásmovém světle se vůči vlnové délce na 25 °C liší maximálně o **4,48 nm** a mezi jednotlivými kroky se maximálně liší o **3,46 nm**.

Po prudkém ochlazení se rozdíly vlnových délek moc nezměnily. V modrém světle po ochlazení maximální rozdíl  $\lambda$  vůči 25 °C je **1,9 nm** a vůči předchozím teplotám **1,69 nm**. V širokopásmovém světle je maximální rozdíl vůči 25 °C **3,45 nm** a vůči předchozím teplotám je maximální rozdíl **5,49 nm**.

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	1,9	1,9	-0,41	-0,41
35	1,48	-0,42	-3,87	-3,46
40	0,63	-0,85	-1,63	2,24
45	1,06	0,43	-4,48	-2,85
50	1,27	0,21	-1,22	3,26
55	0,63	-0,64	-0,61	0,61
60	0,63	0	-1,63	-1,02
65	0	-0,63	0,61	2,24
70	1,48	1,48	-2,04	-2,65
75	-1,48	-2,96	-1,22	0,82
80	1,27	2,75	-0,21	1,01

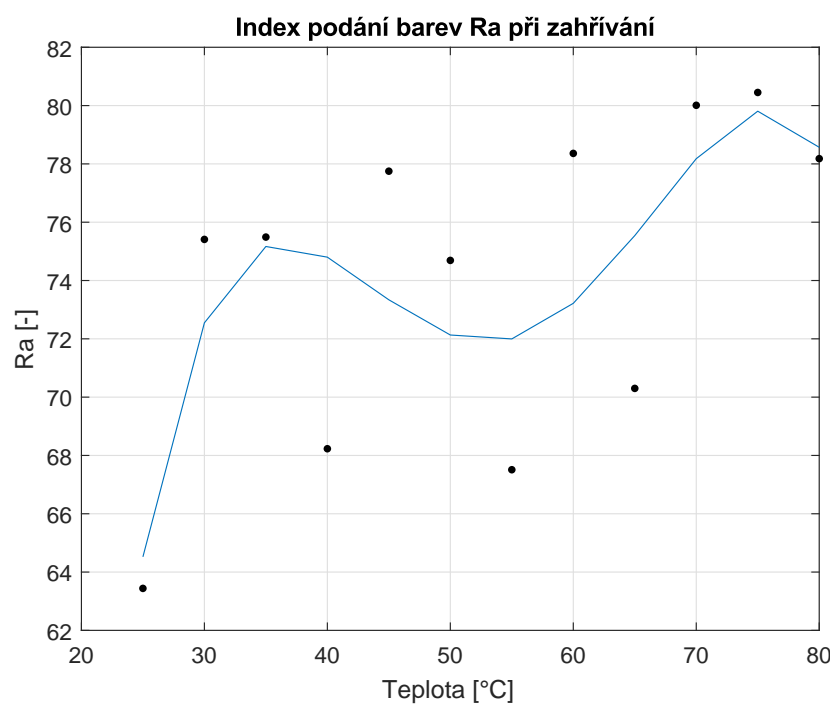
Tabulka 8.14: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek před ochlazením

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	0,85	0,85	-3,1	-3,05
35	0,43	-0,42	-1,6	1,42
40	-0,42	-0,85	-2,9	-1,22
45	-0,63	-0,21	-0,8	2,03
50	0,21	0,84	-2,4	-1,62
55	-1,06	-1,27	-2,9	-0,41
60	-1,48	-0,42	-2,4	0,41
65	0,21	1,69	-1	1,42
70	0,43	0,22	-2	-1,02
75	0,85	0,42	3,45	5,49
80	-1,9	-2,75	2,03	-1,42

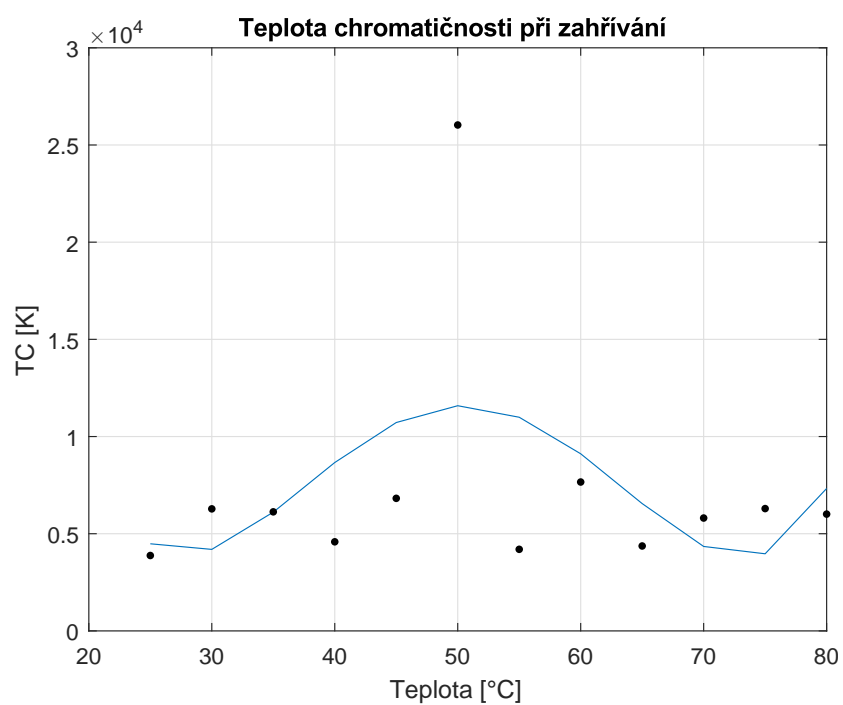
Tabulka 8.15: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po ochlazení

kde,  $\Delta_{25}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 25 °C

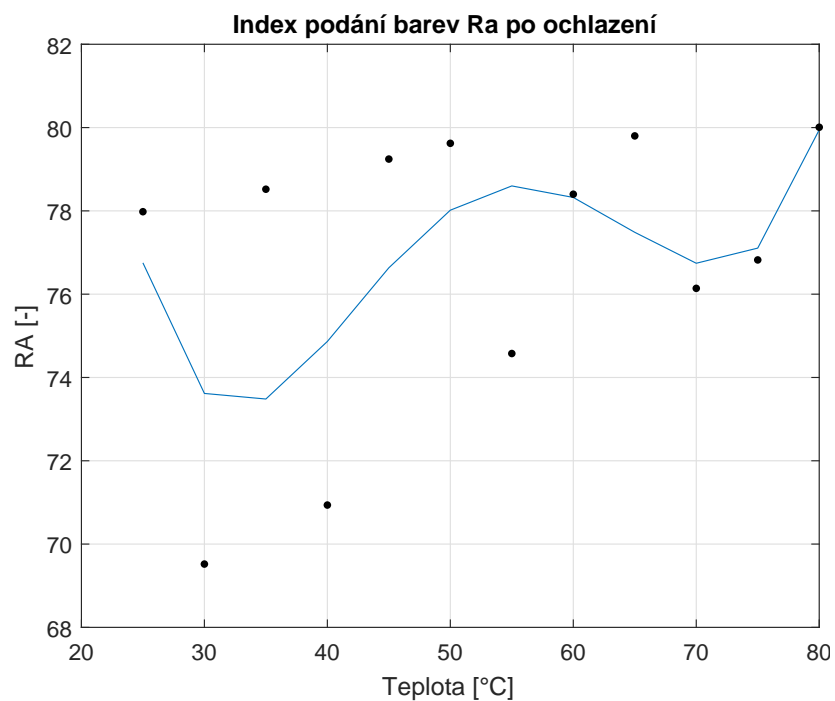
$\Delta_{předchozí}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě



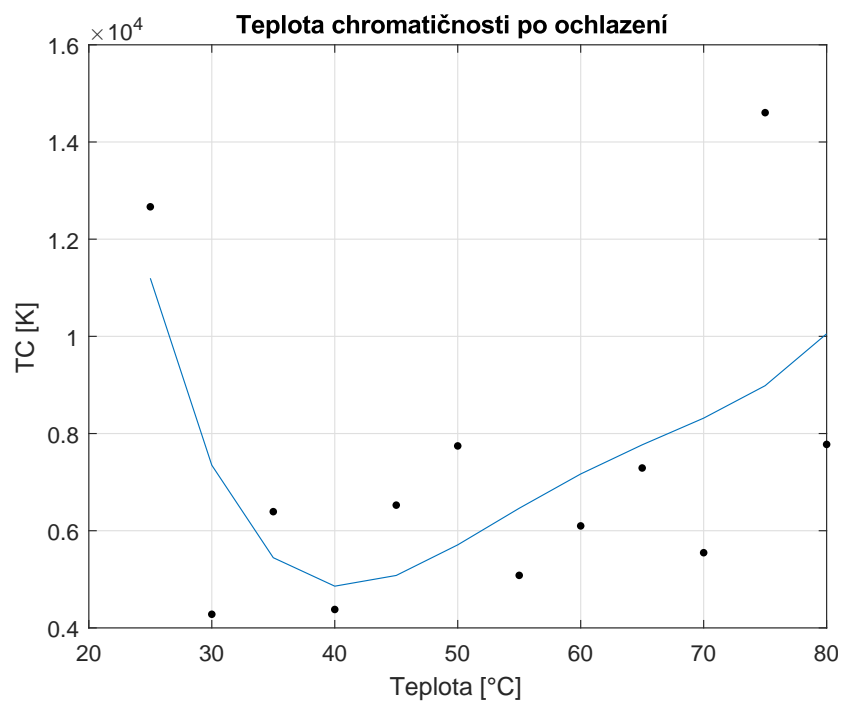
Obrázek 8.16: Index podání barev před prudkým ochlazením



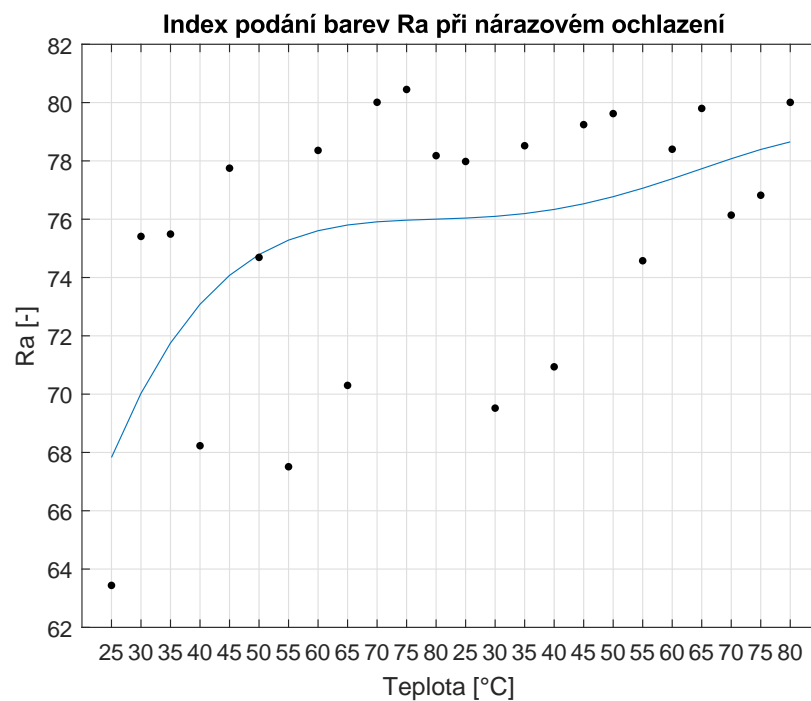
Obrázek 8.17: Teplota chromatičnosti před prudkým ochlazením



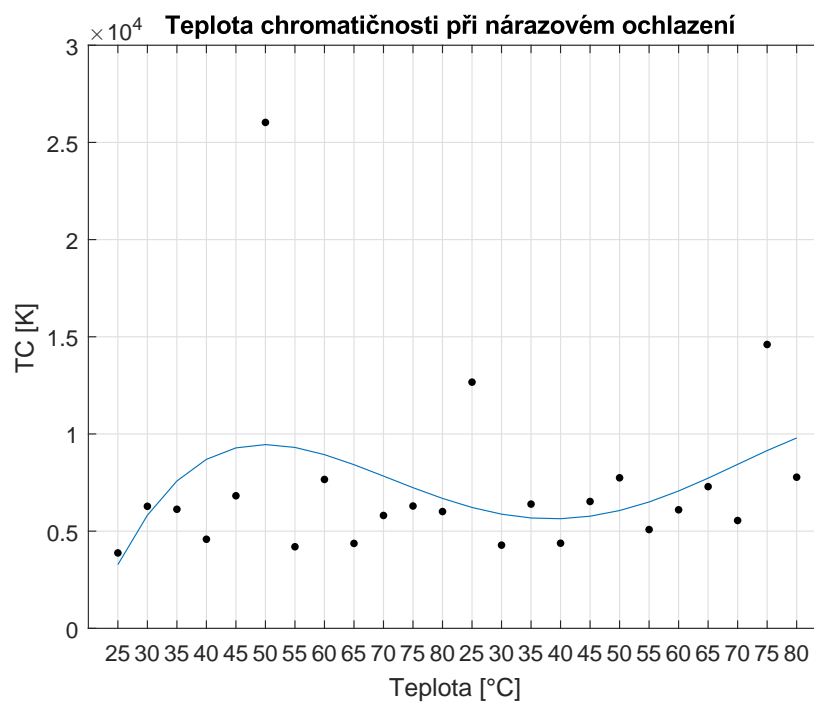
Obrázek 8.18: Index podání barev po prudkém ochlazení



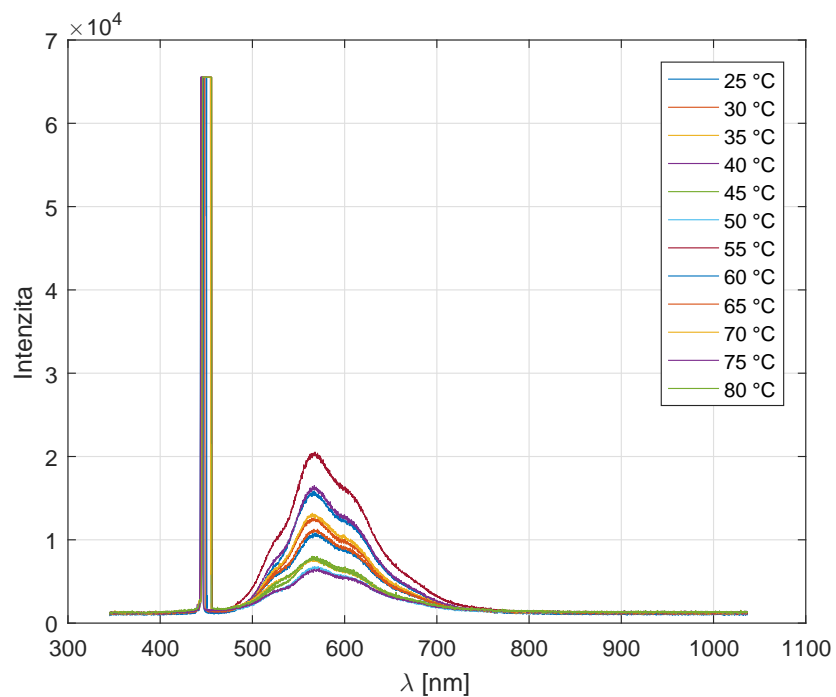
Obrázek 8.19: Teplota chromatičnosti po prudkém ochlazení



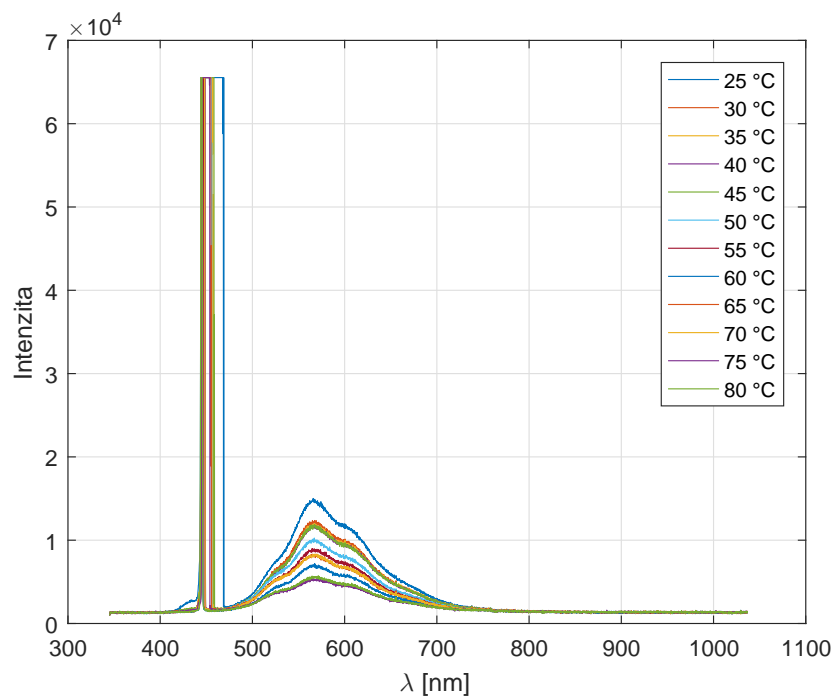
Obrázek 8.20: Index podání barev při prudkém ochlazení



Obrázek 8.21: Teplota chromatičnosti při prudkém ochlazení



Obrázek 8.22: Spektrální charakteristika měření prudkého ochlazení při prvním zahřívání vzorku



Obrázek 8.23: Spektrální charakteristika měření prudkého ochlazení při druhém zahřívání vzorku

#### 8.1.4 Opakované namáhání vzorku po určité době

Z naměřených výsledků indexu podání barev a teploty chromatičnosti při prvním namáháním vzorku, které jsou v tabulce 8.16 lze vidět, že nejvyšší naměřená hodnota Ra je při 80 °C s hodnotou **80,15** a minimální hodnotou **71,4** při 60 °C. Průměrný index podání barev při prvním namáháním vzorku je **76,12**. Na grafu 8.24 lze vidět, že index podání barev stoupá s teplotou, ale mezi 40 °C a 55 °C index podání barev rapidně klesl.

Teplota chromatičnosti při prvním namáháním vzorku má nejvyšší naměřenou hodnotu **36 379K** při 25 °C a nejmenší naměřenou hodnotu **4720K**. V průměru teplota chromatičnosti má **11006,17K** a hned na 30 °C se ustálila křivka na této průměrné hodnotě jak lze vidět na grafu 8.25.

Naměřené výsledky Ra a Tc po druhém teplotním namáhání jsou v tabulce 8.17. Nejvyšší naměřená hodnota Ra je při 55 °C (**86,211**) a nejnižší při teplotě 45 °C (**61,82**). Index podání barev po ochlazení vzorku se liší pouze minimálně v průměrné hodnotě (**76,39**), ale jak lze vidět na grafu 8.26, tak je křivka klesající od 25 °C do 35 °C a od 40 °C do 80 °C je graf rostoucí.

Na grafu 8.27 je graficky znázorněno chování teploty chromatičnosti při zvyšující se teplotě. Z grafu jde vyčíst, že při teplotě 50 °C je naměřená nejvyšší Tc **4534,1K** a nejvyšší Tc při 30 °C **15429,4K**. Průměrná teplota chromatičnosti po ochlazení je **7660,039K**, to je o **3346,1324K** méně než tomu bylo při prvním namáháním vzorku.

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	73,33333	36379
30	74,77778	5999,444
35	79,51111	11399,67
40	79,36667	8502
45	75,73333	5765,111
50	72,54444	5076,889
55	71,41111	4754,889
60	71,95556	4720,778
65	75,35	29648,5
70	79,81111	6434,778
75	79,5	6041,667
80	80,15556	7351,333

Tabulka 8.16: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při prvním namáháním vzorku

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	78,35	5180
30	71,62222	15429,44
35	72,03333	11442,78
40	67,10769	7332
45	61,82222	9554,4
50	80,71111	4534,111
55	86,21111	6426,222
60	79,58889	6198,111
65	80,32222	5732,333
70	80,42222	6034,667
75	80,3	6441,5
80	78,22	7614,9

Tabulka 8.17: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při druhém namáhání vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	65535	448,19	19508,95	567,13
30	65535	447,77	13416,24	569,37
35	65535	448,62	8669,05	568,96
40	65535	446,71	9484,14	570,18
45	65535	446,29	10504,03	568,55
50	65535	447,98	10542,94	567,13
55	65535	447,35	10444,64	568,55
60	65535	447,77	10239,84	566,52
65	65535	447,13	6940,57	567,13
70	65535	447,56	6819,74	571,6
75	65535	446,29	7049,11	567,33
80	65535	445,23	5488,56	567,13
<b>Průměr</b>	<b>65535</b>	<b>447,2408</b>	<b>9925,651</b>	<b>568,2983</b>

Tabulka 8.18: Maximální naměřené hodnoty ve spektru při prvním namáhání



Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	65535	445,65	7135,12	567,54
30	65535	446,92	10682,2	570,18
35	65535	445,86	4495,29	570,18
40	65535	447,56	6483,87	573,43
45	65535	444,59	3495,88	571,2
50	65535	446,08	5492,65	569,98
55	54344,9	444,38	2676,7	571,6
60	65535	445,44	5160,88	569,98
65	65535	445,86	6627,23	566,72
70	65535	446,29	6485,92	571,8
75	65535	446,08	6125,47	569,98
80	65535	446,5	4769,72	569,98
<b>Průměr</b>	<b>64602,49</b>	<b>445,9342</b>	<b>5802,578</b>	<b>570,2142</b>

Tabulka 8.19: Maximální naměřené hodnoty ve spektru při druhém namáhání

V tabulce 8.18 lze vidět naměřené hodnoty intenzity a vlnových délek před ochlazením vzorku. Intenzita je zde opět na všech teplotách **65535** a  $\lambda$  v průměru na **447,2408 nm** v modrém světle. V širokopásmovém světle je průměrná intenzita **9925,651** a  $\lambda$  v průměru na **568,2983 nm**. Tyto naměřené hodnoty lze vidět na spektrální charakteristice na 8.30.

V tabulce 8.19 lze vidět naměřené hodnoty intenzity a vlnových délek před ochlazením vzorku. Intenzita je zde opět na všech teplotách **65535** kromě jedné na 55 °C kde je intenzita **54344,9** a  $\lambda$  v průměru na **445,9342 nm** v modrém světle. To je posun  $\lambda$  o **1,3 nm**. V širokopásmovém světle je průměrná intenzita **5802,578** a  $\lambda$  v průměru na **570,2142 nm**. To je o **1,91 nm** více než před ochlazením. Tyto naměřené hodnoty jdou vidět na spektrální charakteristice na 8.31. Integrační doba byla automaticky nastavena programem SpectraSuite na **100000  $\mu s$** .

V tabulce 8.20 jde vidět, že pro modré světlo před ochlazením se vlnová délka  $\lambda$  liší maximálně o **1,9 nm** vůči 25 °C a mezi jednotlivými teplotami se maximálně liší o **1,91 nm**. V širokopásmovém světle se vůči vlnové délce na 25 °C liší maximálně o **4,47 nm** a mezi jednotlivými kroky se maximálně liší o **4,47 nm**.

V tabulce 8.21 jde vidět, že pro modré světlo po ochlazení se vlnová délka  $\lambda$  liší maximálně o **1,91 nm** vůči 25 °C a mezi jednotlivými teplotami se maximálně liší o **2,97 nm**. V širokopásmovém světle se vůči vlnové délce na 25 °C liší maximálně o **5,89 nm** a mezi jednotlivými kroky se maximálně liší o **5,08 nm**.

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	-0,42	-0,42	2,24	2,24
35	0,43	0,85	1,83	-0,41
40	-1,48	-1,91	3,05	1,22
45	-1,9	-0,42	1,42	-1,63
50	-0,21	1,69	0	-1,42
55	-0,84	-0,63	1,42	1,42
60	-0,42	0,42	-0,61	-2,03
65	-1,06	-0,64	0	0,61
70	-0,63	0,43	4,47	4,47
75	-1,9	-1,27	0,2	-4,27
80	-2,96	-1,06	0	-0,2

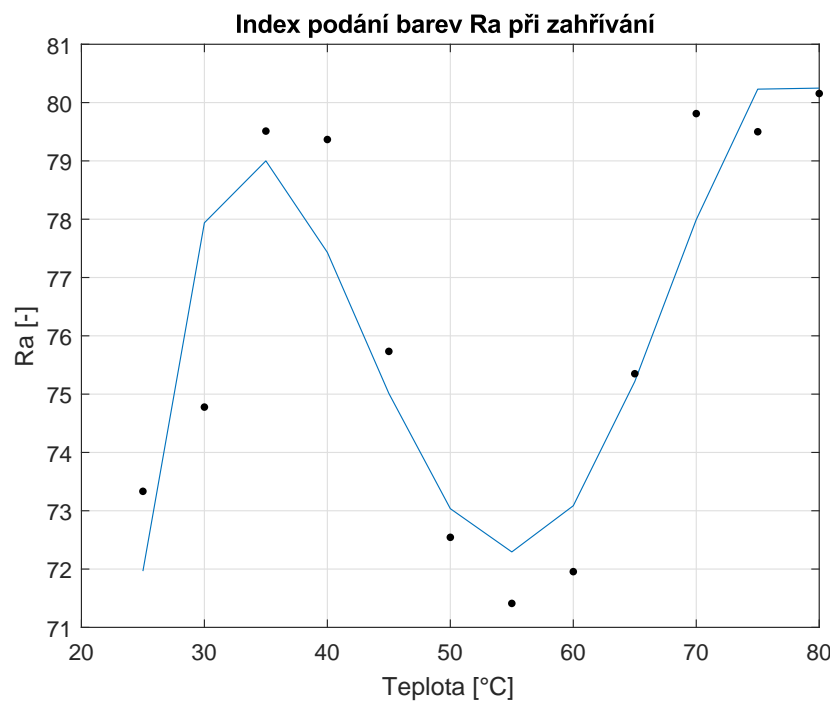
Tabulka 8.20: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek při prvním namáhání vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	1,27	1,27	2,64	2,64
35	0,21	-1,06	2,64	0
40	1,91	1,7	5,89	3,25
45	-1,06	-2,97	3,66	-2,23
50	0,43	1,49	2,44	-1,22
55	-1,27	-1,7	4,06	1,62
60	-0,21	1,06	2,44	-1,62
65	0,21	0,42	-0,82	-3,26
70	0,64	0,43	4,26	5,08
75	0,43	-0,21	2,44	-1,82
80	0,85	0,42	2,44	0

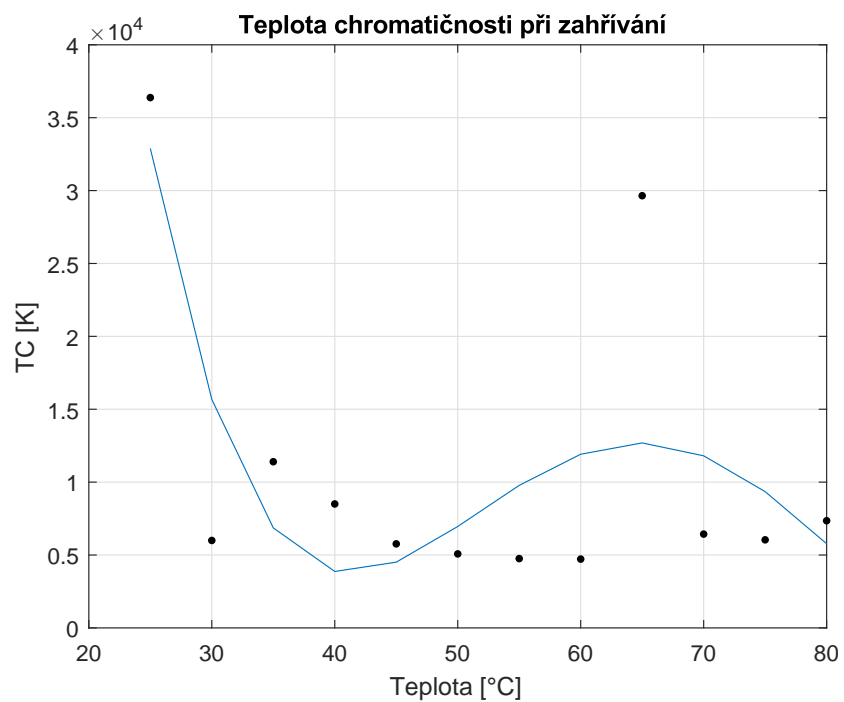
Tabulka 8.21: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po druhém namáhání vzorku

kde,  $\Delta_{25}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 25 °C

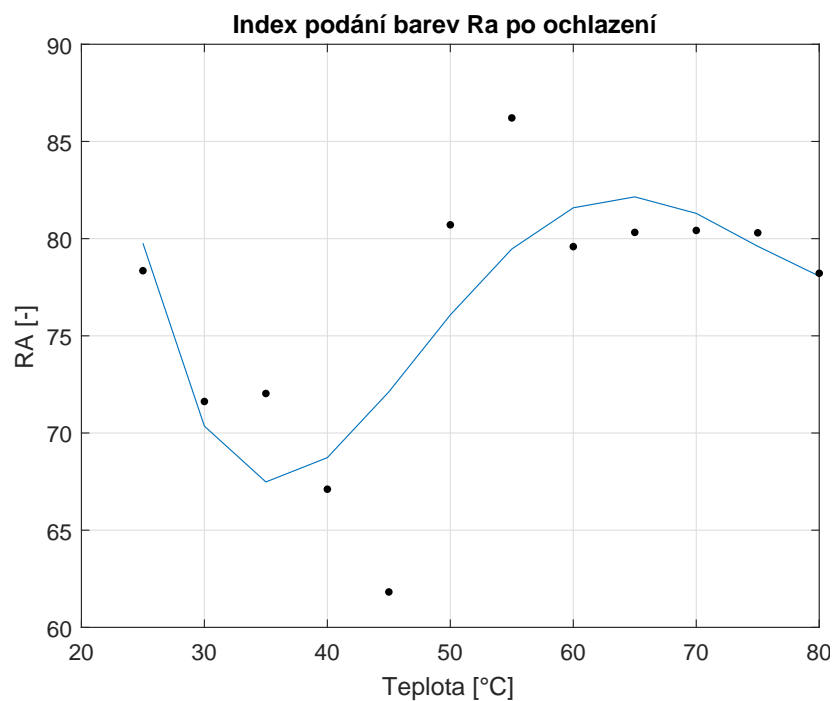
$\Delta_{předchozí}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě



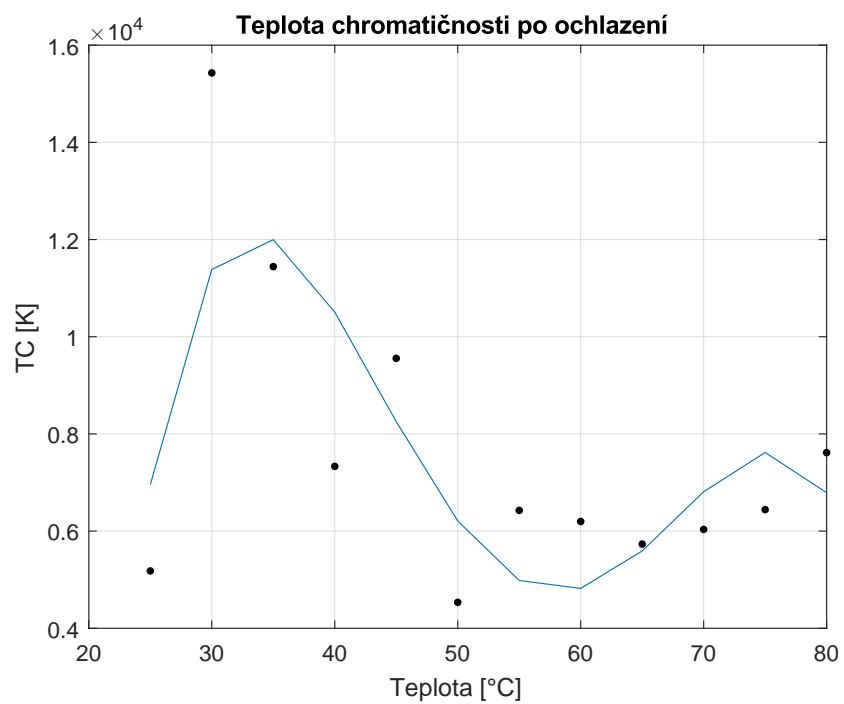
Obrázek 8.24: Index podání barev po prvním namáhání vzorku



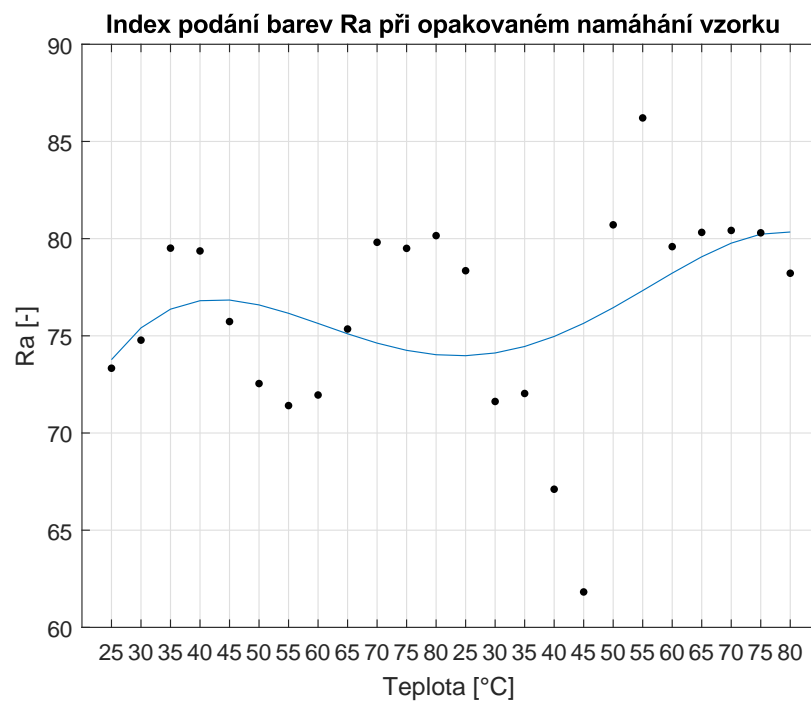
Obrázek 8.25: Teplota chromatičnosti po prvním namáhání vzorku



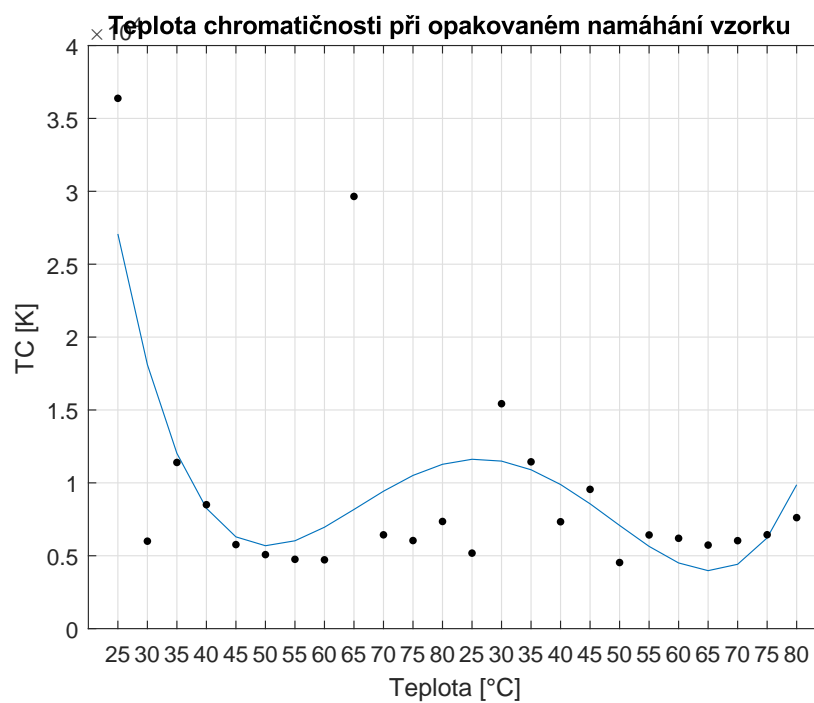
Obrázek 8.26: Index podání barev po druhém namáhání vzorku



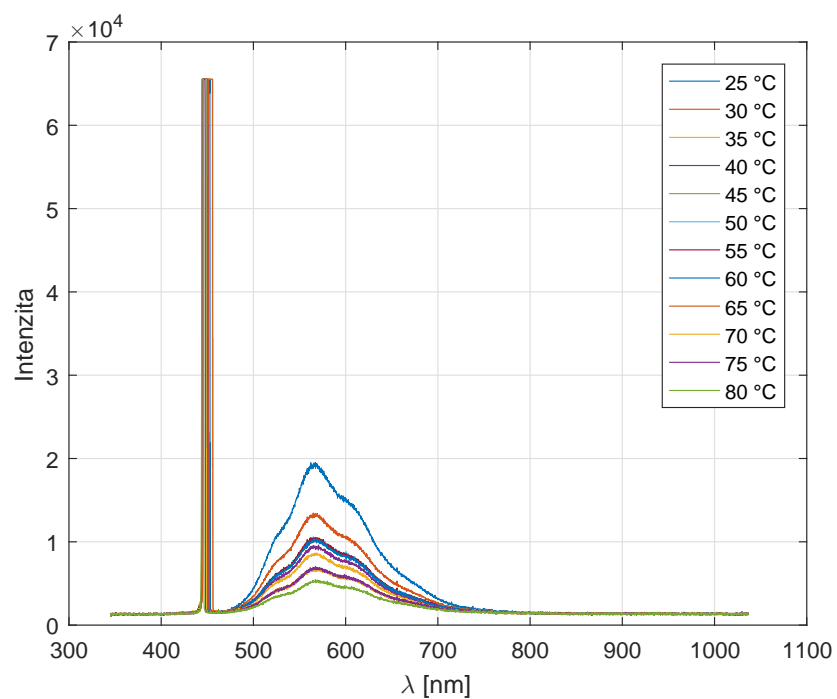
Obrázek 8.27: Teplota chromatičnosti po druhém namáhání vzorku



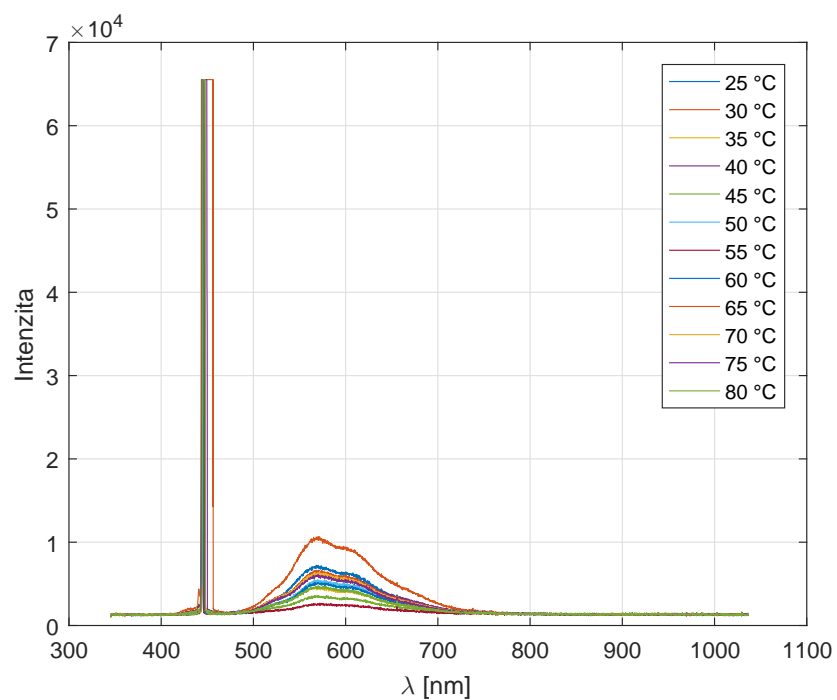
Obrázek 8.28: Index podání barev při opakovaném namáhání vzorku



Obrázek 8.29: Teplota chromatičnosti při opakovaném namáhání vzorku



Obrázek 8.30: Spektrální charakteristika po prvním namáhání vzorku



Obrázek 8.31: Spektrální charakteristika po druhém namáhání vzorku

### 8.1.5 Shrnutí naměřených hodnot

Typ měření	Před ochlazením		Po ochlazení	
	Ra [-]	Tc [K]	Ra [-]	Tc [K]
Postupné zvyšování teploty	89,96	10648,48	-	-
Pozvolné ochlazování	79,17	10892,8	78,85	11457,2
Prudké ochlazení	74,15	7337,7	76,79	7365,774
Opakované namáhání	76,12	11006,17	76,39	7660,039

Tabulka 8.22: Průměrné naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti pro koncentraci vzorku 1:2

V tabulce 8.22 jsou shrnuty průměrné naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti vzorků s koncentrací luminoforu 1:2. Jde vidět, že v prvním typu měření (postupné zvyšování teploty) je index podání barev maximální naměřenou hodnotou (**89,96**). V dalších typech měření se index podání barev ustálil na průměrných **76,48**. Teplota chromatičnosti před ochlazením vzorku má průměrnou hodnotu **9971,288 K**, kde při měření prudkého ochlazení byl rozdíl až o **3000 K** s porovnáním ostatních typů měření před ochlazením. Naměřené hodnoty po ochlazení jsou velmi podobné. Index podání barev je průměrně po ochlazení **77,34**. U teploty chromatičnosti při měření pozvolného ochlazování (**11457,2**) je o **4000 K** vyšší než u dalších typů měření.

Co se týče porovnání výsledků před ochlazením a po ochlazení, tak naměřené hodnoty jsou velmi podobné jak pro index podání barev tak i pro teplotu chromatičnosti. Jediným větším rozdílem je u posledního typu měření, kde před ochlazením je průměrná teplota chromatičnosti **11006,17 K** a po ochlazení je v průměru **7660,039 K** to je rozdíl o **3346,13 K**.

Typ měření	Modré světlo			
	Před ochlazením		Po ochlazení	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
Postupné zvyšování teploty	28403,11	447,2042	-	-
Pozvolné ochlazování	37898,52	445,9892	60916,36	447,0955
Prudké ochlazení	65535	447,2392	65535	446,7108
Opakované namáhání	65535	447,2408	64602,49	445,9342

Tabulka 8.23: Průměrné naměřené hodnoty modrého světla intenzity a  $\lambda$  pro koncentraci vzorku 1:2

V tabulce 8.23 jsou shrnuty průměrné naměřené hodnoty intenzity a maximální vlnové délky vzorků s koncentrací luminoforu 1:2 v modrém světle. Jak již bylo zmíněno, tak intenzita byla ovlivněna zdrojem záření a citlivostí spektrometru. Z tohoto důvodu naměřené hodnoty a rozdíly nemají velkou vypovídací hodnotu. Maximální vlnové délky v modrém světle byly i z důvodu časté saturace velmi podobné a stabilní se skoro žádným posunem mezi sebou.

Typ měření	Širokopásmové světlo			
	Před ochlazením		Po ochlazení	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
Postupné zvyšování teploty	1768,817	568,2308	-	-
Pozvolné ochlazování	1564,541	569,4833	1715,775	567,07
Prudké ochlazení	11408,89	567,3675	9670,338	568,8417
Opakované namáhání	9925,651	568,2983	5802,578	570,2142

Tabulka 8.24: Průměrné naměřené hodnoty širokopásmového světla intenzity a  $\lambda$  pro koncentraci vzorku 1:2

V tabulce 8.24 jsou shrnuty průměrné naměřené hodnoty intenzity a maximální vlnové délky vzorků s koncentrací luminoforu 1:2 v širokopásmovém světle. Maximální  $\lambda$  před ochlazením je průměrně **568,34 nm**, kde nejvyšší rozdíl je mezi měřením pozvolného ochlazování (**569,48 nm**) a prudkého ochlazení (**567,36 nm**), kde rozdíl je o **2,11 nm**.

Po ochlazení jsou naměřené hodnoty opět velmi podobné. Průměrná maximální  $\lambda$  je **568,70 nm**, to je o **0,36 nm** více než před ochlazením.

V porovnání mezi sebou, tak maximální vlnové délky jsou vždy vyšší po ochlazení. Nejvyšším rozdílem je v měření pozvolného ochlazování, kde rozdíl je o **2,41 nm** a nejmenší je v měření prudkého ochlazení, kde rozdíl je o **1,47 nm**.



## 8.2 Vzorek s koncentrací luminoforu 1:50

### 8.2.1 Postupné zvyšování teploty

Z naměřených výsledků v tabulce 8.25 je vidět, že index podání barev se do 60 °C zvyšoval a od 65 °C kleslo na **65,89**. Nejvyšší naměřené Ra je při 60 °C (**91,65**) a nejmenší při následujících 65 °C (**65,89**). Průměrné Ra při postupném zvyšování teploty je **75,66**. Průběh indexu podání barev závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.32.

Teplota chromatičnosti je průměrně na **5198,817K**. Jediný větší nárůst byl naměřen z 45 °C (**4864,1**) na 50 °C (**6300,9**), kde Tc narostla o **1436,8K**. Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.33.

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	66,02	4478,3
30	75,52	5030,4
35	74,09	5352,3
40	83,26	4891
45	86,35	4864,1
50	74,25	6300,9
55	90,17	4765,9
60	91,65	4784,6
65	65,89	5341,6
70	65,91	5383,4
75	66,44	5464,8
80	68,36	5728,5

Tabulka 8.25: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti

V tabulce 8.26 lze vidět, že naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **59418,06** a daná  $\lambda$  na **447,2767 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 30 °C (**444,81 nm**) a nejvyšší na 80 °C (**449,67 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 80 °C s rozdílem **3,81 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 30 a 35 °C, kde na 35 °C byla  $\lambda$  větší o **2,54 nm**. To lze vidět v tabulce 8.27.

V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **11088,73** a daná  $\lambda$  na **560,9616 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 80 °C (**559,59 nm**) a nejvyšší na 75 °C (**562,24 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 80 °C s rozdílem **-2,25 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 75 a 80 °C, kde na 75 °C byla  $\lambda$  větší o **2,65 nm**. Integrační čas pro měření postupného zvyšování teploty bylo automaticky nastaveno na **7697  $\mu$ s**. Spektrální charakteristika těchto naměřených hodnot lze vidět na obrázku 8.34.

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	43773,28	445,86	8210	561,84
30	26035,83	444,81	5042,1	561,84
35	65535	447,35	15552,27	561,02
40	65535	446,5	10151,78	560,21
45	65535	446,71	12853,05	561,02
50	53392,59	445,23	5457,84	560,21
55	65535	447,35	11921,23	559,69
60	65535	447,35	12300,1	561,84
65	65535	448,83	13222,04	561,43
70	65535	448,83	12977,98	560,61
75	65535	448,83	13199,16	562,24
80	65535	449,67	12177,22	559,59
<b>Průměr</b>	<b>59418,06</b>	<b>447,2767</b>	<b>11088,73</b>	<b>560,961667</b>

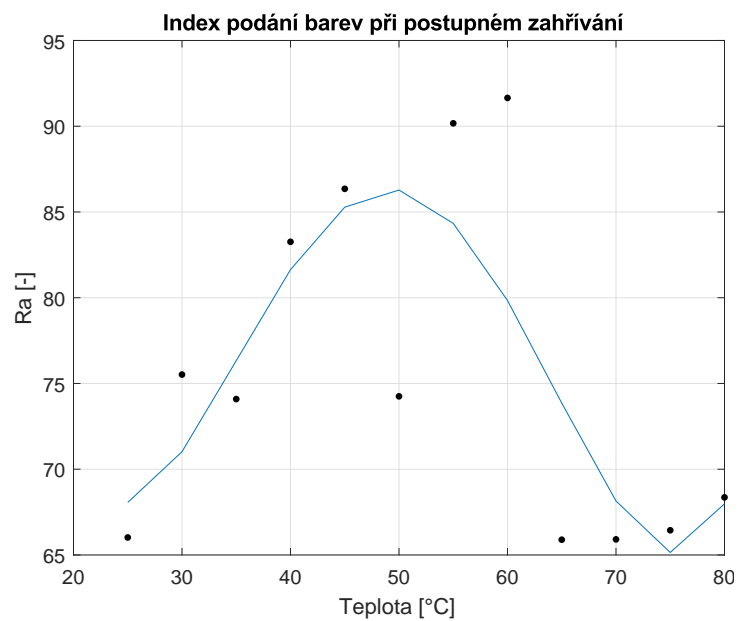
Tabulka 8.26: Maximální naměřené hodnoty ve spektru při postupném zvyšování teploty

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	-1,05	-1,05	0	0
35	1,49	2,54	-0,82	-0,82
40	0,64	-0,85	-1,63	-0,81
45	0,85	0,21	-0,82	0,81
50	-0,63	-1,48	-1,63	-0,81
55	1,49	2,12	-2,15	-0,52
60	1,49	0	0	2,15
65	2,97	1,48	-0,41	-0,41
70	2,97	0	-1,23	-0,82
75	2,97	0	0,4	1,63
80	3,81	0,84	-2,25	-2,65

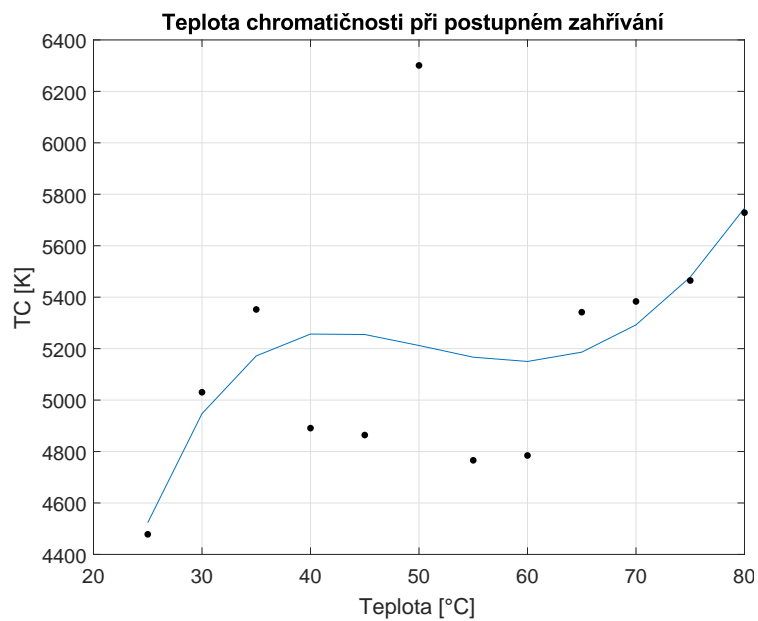
Tabulka 8.27: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek

kde,  $\Delta_{25}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 25 °C

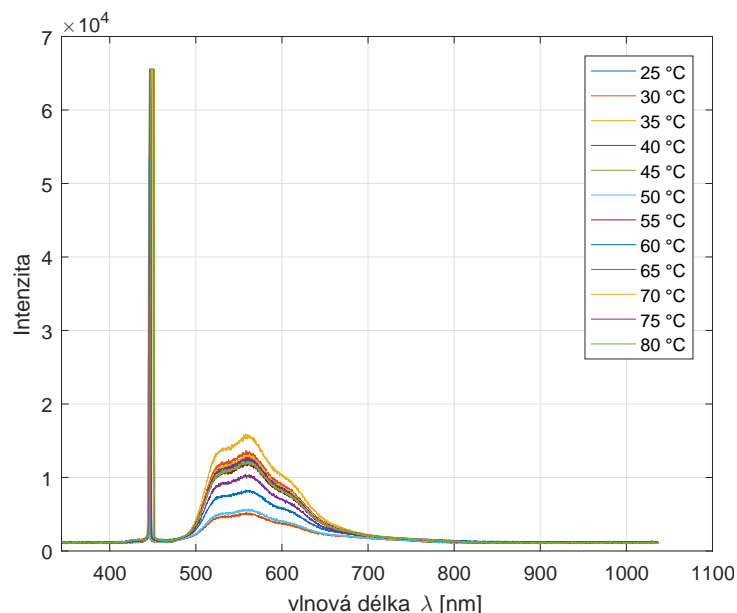
$\Delta_{předchozí}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě



Obrázek 8.32: Index podání barev při postupném zahřívání



Obrázek 8.33: Teplota chromatičnosti při postupném zahřívání



Obrázek 8.34: Spektrální charakteristika měření zvyšování teploty

### 8.2.2 Pozvolné ochlazování

Z naměřených výsledků v tabulce 8.28 je vidět, že index podání barev při zahřívání vzorku se do 45 °C průměrně pohyboval na hodnotě **80,42** a od 50 °C klesl na **57,48**. Nejvyšší naměřené Ra je při 40 °C (**85,50**) a nejmenší při 55 °C (**55,47**). Průměrné Ra při zahřívání vzorku je **67,74**. Průběh indexu podání barev závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.35. Teplota chromatičnosti je průměrně na **4459,91K**. Průběh teploty chromatičnosti v závislosti na teplotě je téměř konstantní a nejvyšší rozdíl Tc je **1059,8K**. Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.36.

Při ochlazování se index podání barev zvyšoval se zmenšující se teplotou. Průměrné Ra bylo **73,49381**, kde nejmenší Ra bylo naměřeno na 75 °C (**62,29**) a nejvyšší na 45 °C (**87,6**). Tyto naměřená data lze vidět v grafu 8.37. Průměrná teplota chromatičnosti při ochlazování podle tabulky 8.29 je **5773,182K**. Nejvyšší naměřená Tc při 65 °C (**8642,7K**) a nejnižší při 75 °C (**4381,2K**), takže Tc se pohybuje v rozmezí **4261,5K**. Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě při ochlazování je graficky znázorněn na grafu 8.38.

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	81,77	4676
30	79,62	4757,889
35	84,99	4632,875
40	85,50	4649
45	70,22	5244,4
50	57,48	4209,3
55	55,47	4191,2
60	56,19	4184,6
65	58,61	4196,2
70	62,37	4303,9
75	60,52	4212,7
80	60,17	4260,9

Tabulka 8.28: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při zahřívání vzorku

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
75	62,29	4381,2
70	69,53	6032,6
65	74,14	8642,7
60	78,96	5434,4
55	62,54286	4719,286
50	73,28571	8399,143
45	87,6	5487,111
40	64,5111	5016
35	75,37	5499,6
30	77,33222	4914,667
25	82,87	4978,3

Tabulka 8.29: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při ochlazování vzorku

V tabulce 8.30 lze vidět, že při zahřívání naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **45627,04** a daná  $\lambda$  na **446,0592 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 25, 30 a 40°C (**444,17 nm**) a nejvyšší na 60°C (**447,98 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 60 °C s rozdílem **3,81 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 45 a 50 °C, kde na 50 °C byla  $\lambda$  větší o **2,54 nm**. To lze vidět v tabulce 8.32. V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **12321,26** a daná  $\lambda$  na **562,2083 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 55 a 65 °C (**558,37 nm**) a nejvyšší na 50 °C (**568,35 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 55 a 65 °C s rozdílem **-8,56 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 50 a 55 °C, kde na 50 °C byla  $\lambda$  větší o **9,98 nm**.

V tabulce 8.31 lze vidět, že při ochlazování naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **61874,72** a daná  $\lambda$  na **445,7482 nm**, to je o **0,31 nm** méně než při zahřívání.

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	12633,92	444,17	3000,27	566,93
30	10624,86	444,38	3020,75	561,63
35	8714,11	444,17	2590,68	561,63
40	4958,13	444,17	2211,81	560
45	51848,42	444,81	6938,52	565,1
50	65535	447,35	23383,71	568,35
55	65535	447,77	24727,17	558,37
60	65535	447,98	22750,88	563,87
65	65535	447,56	18300,65	558,37
70	65535	446,08	11528,02	559,19
75	65535	447,35	14772	562,24
80	65535	446,92	14630,69	560,82
<b>Průměr</b>	<b>45627,04</b>	<b>446,0592</b>	<b>12321,26</b>	<b>562,2083</b>

Tabulka 8.30: NMaximální naměřené hodnoty ve spektru při zahřívání vzorku

Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 25 °C (**444,17 nm**) a nejvyšší na 55 °C (**447,13 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 75 °C bylo při 45 °C s rozdílem **-1,48 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 45 a 40 °C, kde na 40 °C byla  $\lambda$  větší o **1,9 nm**. To lze vidět v tabulce 8.33. V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **8874,407** a daná  $\lambda$  na **559,2582 nm**, to je o **2,95 nm** méně než u zahřívání. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 45 °C (**555,72 nm**) a nejvyšší na 40 a 30 °C (**562,24**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 75 °C bylo při 65 °C s rozdílem **-4,9 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 40 a 45 °C, kde na 40 °C byla  $\lambda$  větší o **6,52 nm**.

Integrační čas pro měření postupného zvyšování teploty bylo automaticky nastaveno na **10272  $\mu s$** . Spektrální charakteristiky těchto naměřených hodnot lze vidět na obrázcích 8.41 a 8.42.

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
75	65535	446,29	12066,63	560,41
70	65535	445,65	7882,63	558,37
65	65535	445,23	5447,6	555,51
60	65535	446,29	10196,84	559,8
55	65535	447,13	12832,57	558,37
50	65535	446,71	6045,6	555,92
45	63657,01	444,81	5406,64	555,72
40	65535	445,86	14726,94	562,24
35	62219,34	445,44	10782,56	561,63
30	65535	445,65	8841,08	562,24
25	30465,58	444,17	3389,39	561,63
<b>Průměr</b>	<b>61874,72</b>	<b>445,748182</b>	<b>8874,407</b>	<b>559,2582</b>

Tabulka 8.31: Maximální naměřené hodnoty ve spektru při ochlazování vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	0,21	0,21	-5,3	-5,3
35	0	-0,21	-5,3	0
40	0	0	-6,93	-1,63
45	0,64	0,64	-1,83	5,1
50	3,18	2,54	1,42	3,25
55	3,6	0,42	-8,56	-9,98
60	3,81	0,21	-3,06	5,5
65	3,39	-0,42	-8,56	-5,5
70	1,91	-1,48	-7,74	0,82
75	3,18	1,27	-4,69	3,05
80	2,75	-0,43	-6,11	-1,42

Tabulka 8.32: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek pro zahřívání vzorku

kde,  $\Delta_{25}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 25 °C

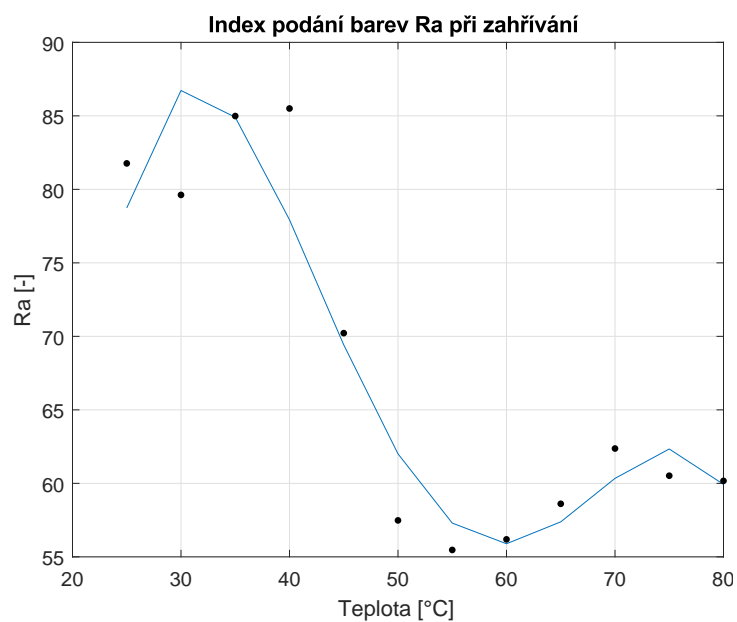
$\Delta_{předchozí}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{75}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{75}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
75	0	0	0	0
70	-0,64	-0,64	-2,04	-2,04
65	-1,06	-0,42	-4,9	-2,86
60	0	1,06	-0,61	4,29
55	0,84	0,84	-2,04	-1,43
50	0,42	-0,42	-4,49	-2,45
45	-1,48	-1,9	-4,69	-0,2
40	-0,43	1,05	1,83	6,52
35	-0,85	-0,42	1,22	-0,61
30	-0,64	0,21	1,83	0,61
25	-2,12	-1,48	1,22	-0,61

Tabulka 8.33: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek pro ochlazování vzorku

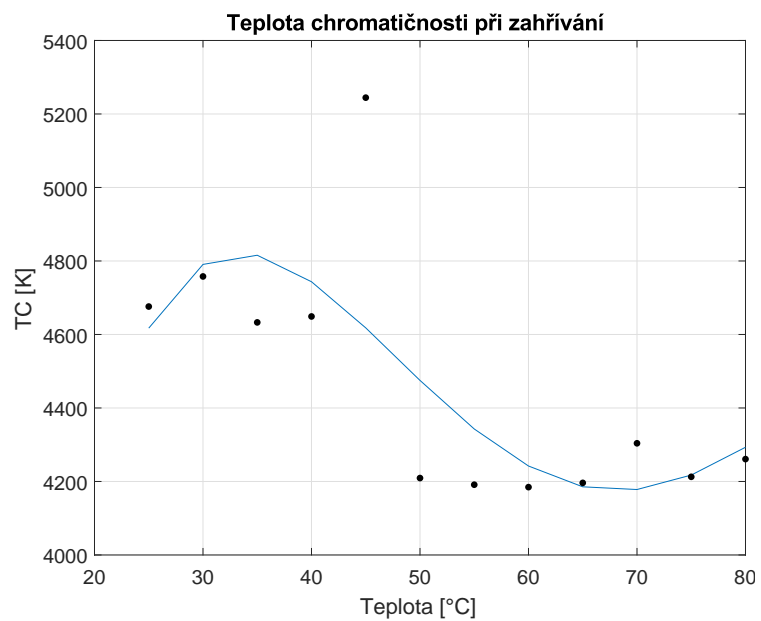
kde,  $\Delta_{75}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 75 °C

$\Delta_{předchozí}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě

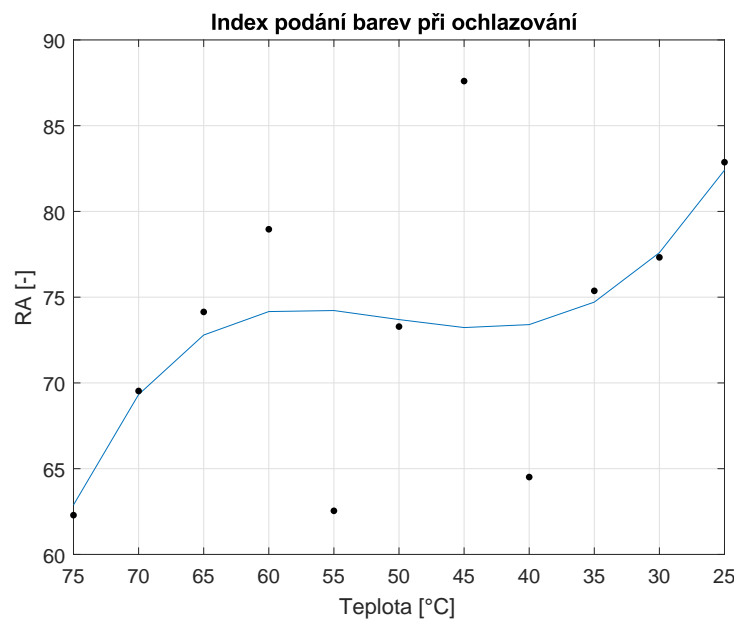


Obrázek 8.35: Index podání barev při zahřívání vzorku

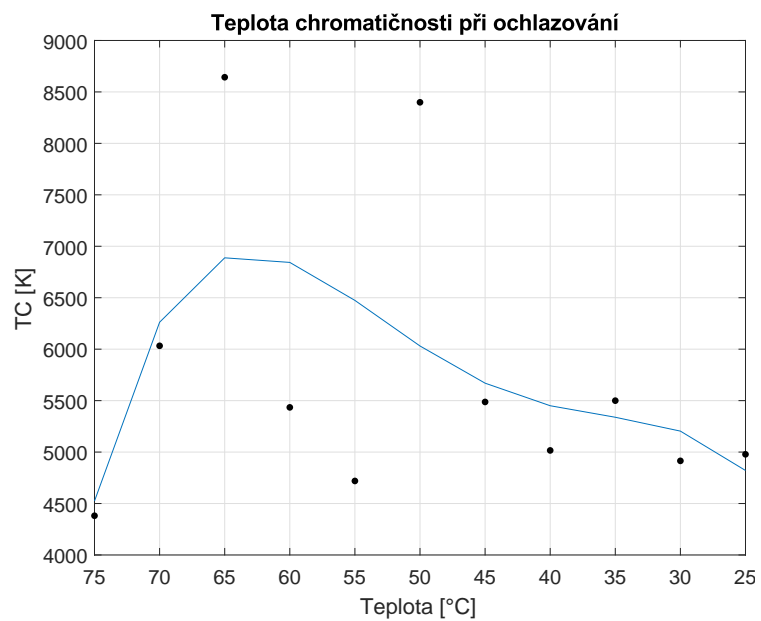




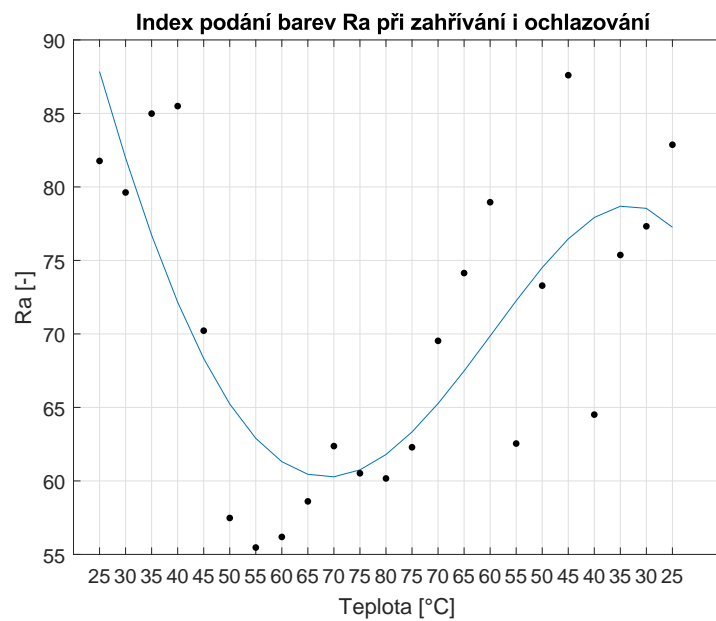
Obrázek 8.36: Teplota chromatičnosti při zahřívání vzorku



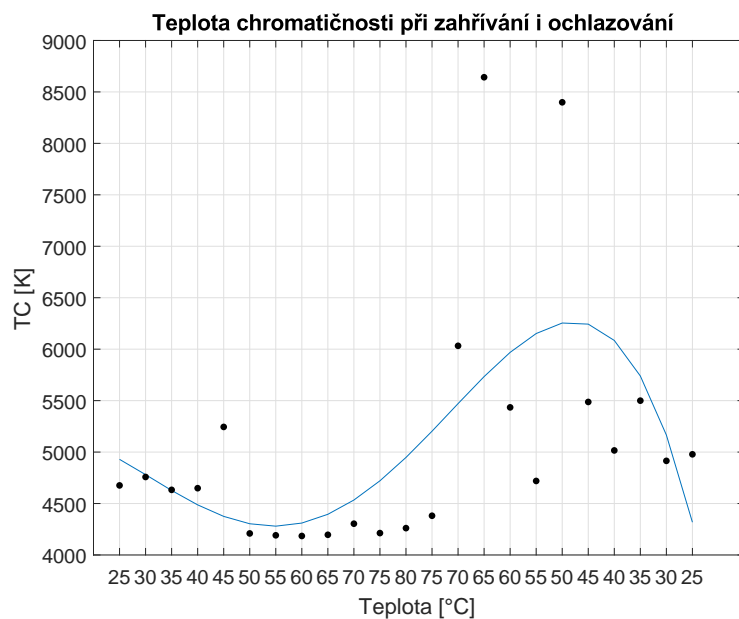
Obrázek 8.37: Index podání barev při ochlazování vzorku



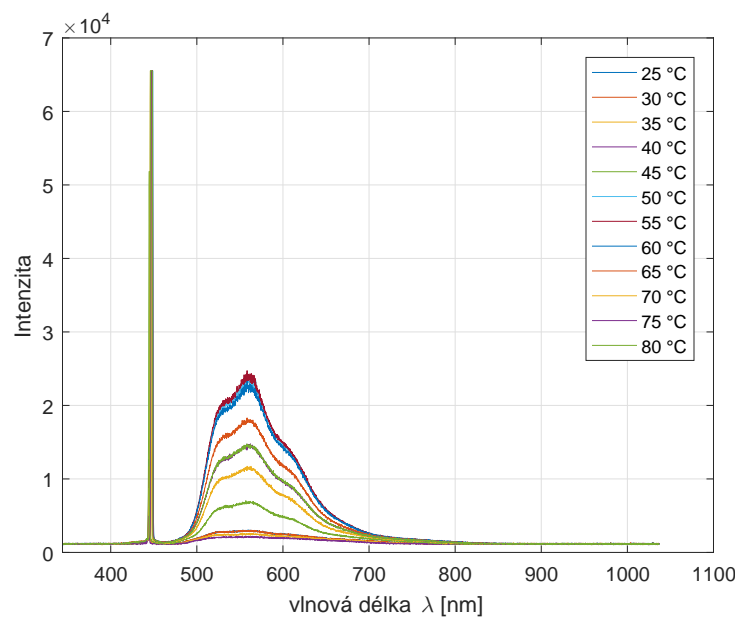
Obrázek 8.38: Teplota chromatičnosti při ochlazování vzorku



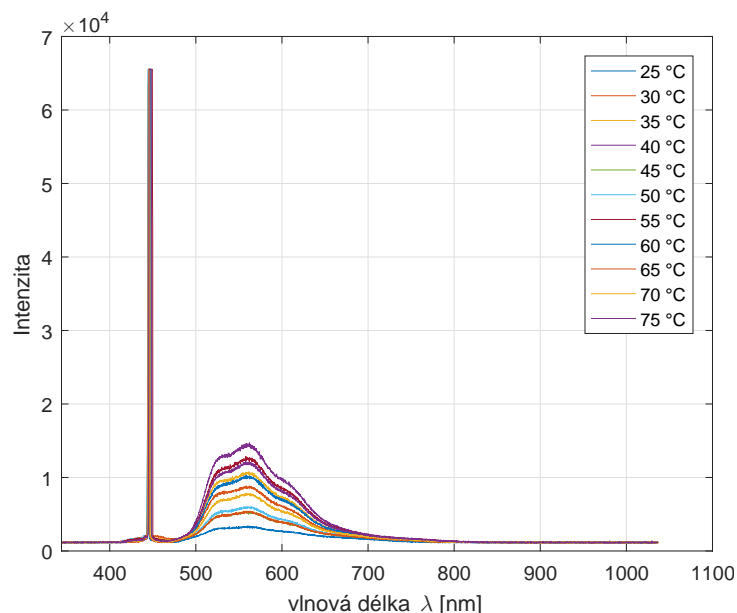
Obrázek 8.39: Index podání barev při zahřívání i ochlazování vzorku



Obrázek 8.40: Teplota chromatičnosti při zahřívání i ochlazování vzorku



Obrázek 8.41: Spektrální charakteristika zahřívání vzorku



Obrázek 8.42: Spektrální charakteristika ochlazování vzorku

### 8.2.3 Prudké ochlazení

Z naměřených výsledků v tabulce 8.34 je vidět, že index podání barev při zahřívání vzorku se průměrně pohyboval na hodnotě **66,3175**. Nejvyšší nárůst Ra je z 65 °C (**73,26**) na 70 °C (**84,08**), kde Ra vzrostlo o **10,82** a zároveň Ra na 70 °C je nejvyšší naměřená hodnota a nejmenší naměřená hodnota je při 50 °C (**61,72**). Průběh indexu podání barev závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.43. Teplota chromatičnosti je průměrně na **5915,933K**. Průběh teploty chromatičnosti v závislosti na teplotě je téměř konstantní vyjma 80 °C, kde Tc vzrostlo o **16822,6K**. Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.44.

Po prudkém ochlazení se index podání barev zvyšoval se zvyšující se teplotou do 60 °C. Průměrné Ra bylo **63,5375**, to je o **2,78** Ra méně než při zahřívání. Nejmenší Ra bylo naměřeno na 25 °C (**57,18**) a nejvyšší na 60 °C (**73,54**). Tyto naměřená data lze vidět v grafu 8.45. Průměrná teplota chromatičnosti po prudkém ochlazení podle tabulky 8.35 je **4915,142K** (o **100,7917K** méně než u zahřívání). Nejvyšší naměřená Tc při 60 °C (**7273K**) a nejnižší při 30 °C (**4289,9K**), takže Tc se pohybuje v rozmezí **2983,1K**. Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě při ochlazování je graficky znázorněn na grafu 8.46.

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	65,27	4921,8
30	61,79	4280,5
35	62,02	4275,8
40	61,64	4303,8
45	61,59	4290,2
50	61,72	4291,3
55	62,83	4296,1
60	63,48	4304,7
65	73,26	5159,1
70	84,08	5413,3
75	64,27	4316
80	73,86	21138,6

Tabulka 8.34: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při zahřívání

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	57,18	4303,4
30	58,2	4289,9
35	60,52	4292,7
40	59,45	4367,2
45	60	4297,3
50	62,39	4422
55	69,11	5522,2
60	73,54	7273
65	60,02	4295
70	61,7	4416,8
75	70,15	5860,3
80	70,19	5641,9

Tabulka 8.35: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti po prudkém ochlazení

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda$ [nm]	Intenzita [-]	$\lambda$ [nm]
25	57789,58	445,86	8144,77	564,89
30	65535	446,92	11192,15	558,37
35	61084,76	447,56	10917,72	557,35
40	65535	447,77	12197,7	560,21
45	65535	447,77	11910,99	562,65
50	65535	447,35	11984,71	558,37
55	65535	447,56	11210,58	559,19
60	63255,61	447,98	10860,38	558,37
65	47740,2	445,86	5670,83	558,37
70	10020,71	444,38	2598,87	568,76
75	65535	447,13	9058,17	560
80	65535	448,4	7458,7	561,84
<b>Průměr</b>	<b>58219,66</b>	<b>447,045</b>	<b>9433,798</b>	<b>560,6975</b>

Tabulka 8.36: Maximální naměřené hodnoty ve spektru při zahřívání vzorku

V tabulce 8.36 lze vidět, že při zahřívání naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **58219,66** a daná  $\lambda$  na **447,045 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 25 °C (**445,86 nm**) a nejvyšší na 60 °C (**447,98 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 80 °C s rozdílem **2,54 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 70 a 75 °C, kde na 75 °C byla  $\lambda$  větší o **2,75 nm**. To lze vidět v tabulce 8.38. V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **9433,798** a daná  $\lambda$  na **560,6975 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 50, 60 a 65 °C (**558,37 nm**) a nejvyšší na 70 °C (**568,76 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 35 °C s rozdílem **-7,54 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 65 a 70 °C, kde na 70 °C byla  $\lambda$  větší o **10,39 nm**.

V tabulce 8.37 lze vidět, že po prudkém ochlazení naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **65506,84** a daná  $\lambda$  na **446,5508 nm**, to je o **0,494 nm** méně než při zahřívání. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 60 °C (**445,23 nm**) a nejvyšší na 30 °C (**447,56 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 60 °C s rozdílem **-1,69 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 60 a 65 °C, kde na 65 °C byla  $\lambda$  větší o **1,69 nm**. To lze vidět v tabulce 8.39. V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **12969,61** a daná  $\lambda$  na **560,8508 nm**, to je o **0,153 nm** více než před ochlazením. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 60 °C (**557,15 nm**) a nejvyšší na 75 a 80 °C (**564,49**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 75 a 80 °C s rozdílem **6,12 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 60 a 65 °C, kde na 60 °C byla  $\lambda$  větší o **6,32 nm**.

Integrační čas pro měření postupného zvyšování teploty bylo automaticky nastaveno na **6307  $\mu$ s**. Spektrální charakteristiky těchto naměřených hodnot lze vidět na obrázcích 8.49 a 8.50.

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	65535	446,92	18884,32	558,37
30	65535	447,56	19201,76	558,37
35	65535	447,13	14331,69	561,84
40	65535	447,13	15562,51	563,87
45	65535	447,35	15628,05	558,37
50	65535	446,29	11763,53	557,96
55	65535	445,86	8494,97	562,24
60	65535	445,23	6510,49	557,15
65	65535	446,92	14808,86	563,47
70	65535	446,71	12799,8	559,59
75	65197,09	445,65	8667	564,49
80	65535	445,86	8982,39	564,49
<b>Průměr</b>	<b>65506,84</b>	<b>446,550833</b>	<b>12969,61</b>	<b>560,850833</b>

Tabulka 8.37: NMaximální naměřené hodnoty ve spektru po prudkém ochlazení vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	1,06	1,06	-6,52	-6,52
35	1,7	0,64	-7,54	-1,02
40	1,91	0,21	-4,68	2,86
45	1,91	0	-2,24	2,44
50	1,49	-0,42	-6,52	-4,28
55	1,7	0,21	-5,7	0,82
60	2,12	0,42	-6,52	-0,82
65	0	-2,12	-6,52	0
70	-1,48	-1,48	3,87	10,39
75	1,27	2,75	-4,89	-8,76
80	2,54	1,27	-3,05	1,84

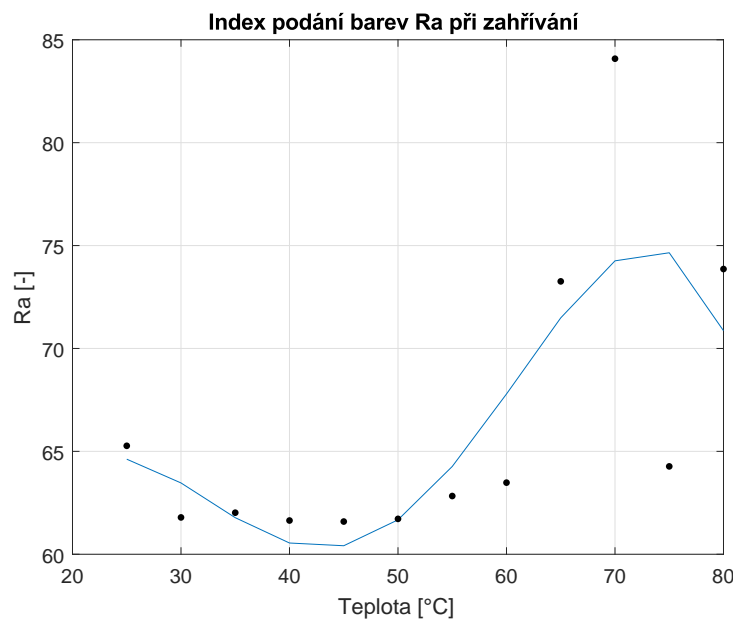
Tabulka 8.38: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek pro zahřívání vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	0,64	0,64	0	0
35	0,21	-0,43	3,47	3,47
40	0,21	0	5,5	2,03
45	0,43	0,22	0	-5,5
50	-0,63	-1,06	-0,41	-0,41
55	-1,06	-0,43	3,87	4,28
60	-1,69	-0,63	-1,22	-5,09
65	0	1,69	5,1	6,32
70	-0,21	-0,21	1,22	-3,88
75	-1,27	-1,06	6,12	4,9
80	-1,06	0,21	6,12	0

Tabulka 8.39: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po prudkém ochlazení vzorku

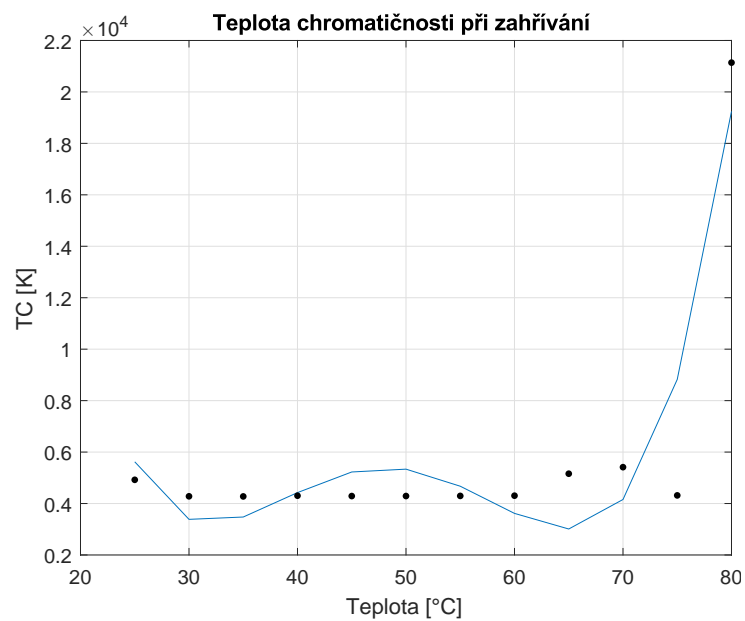
kde,  $\Delta_{25}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 25 °C

$\Delta_{předchozí}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě

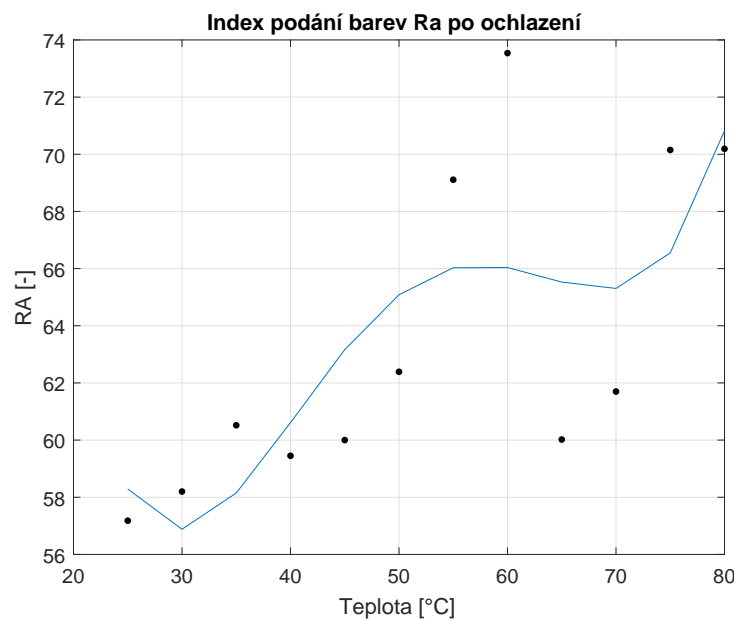


Obrázek 8.43: Index podání barev při zahřívání vzorku

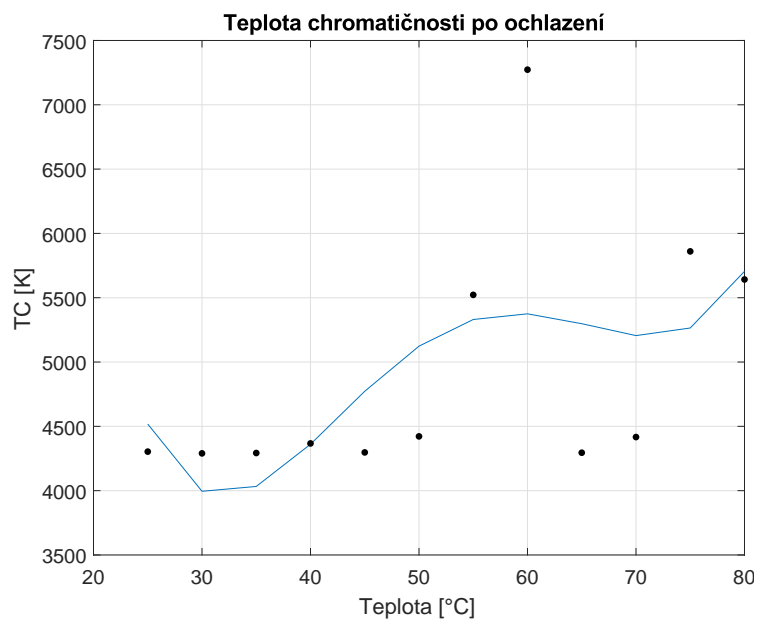




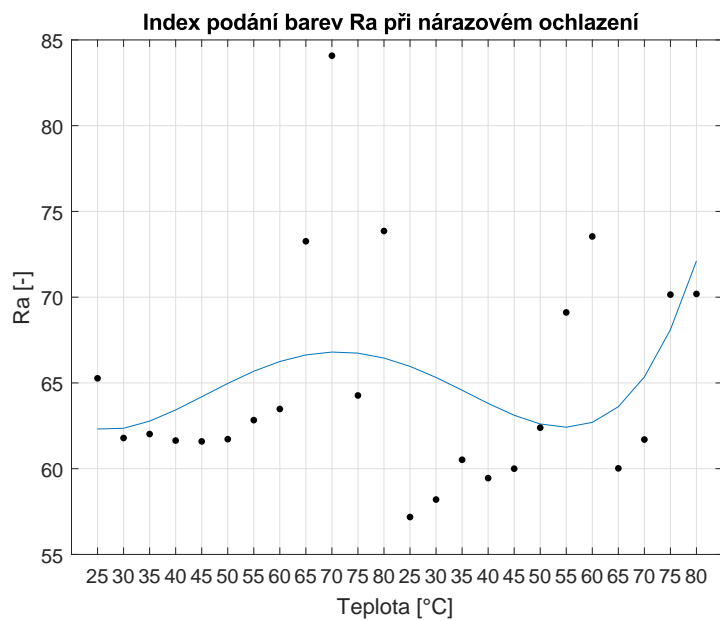
Obrázek 8.44: Teplota chromatičnosti při zahřívání vzorku



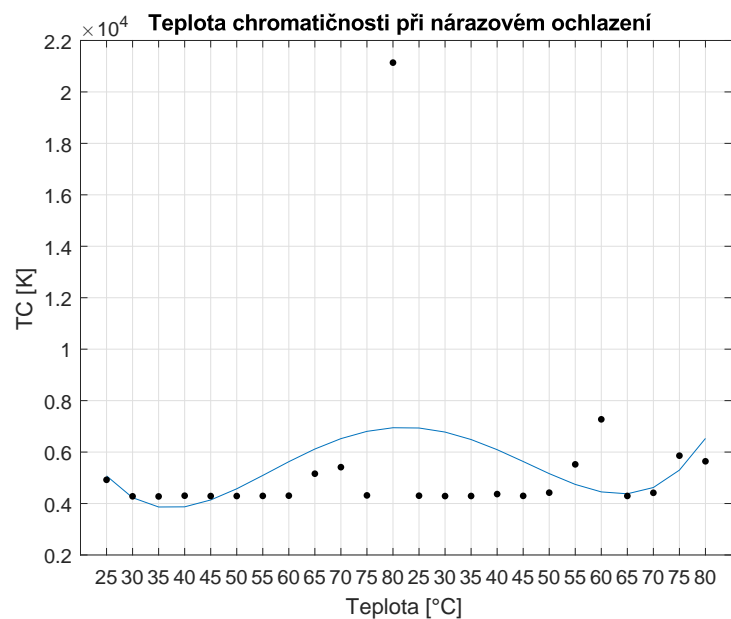
Obrázek 8.45: Index podání barev po prudkém ochlazení vzorku



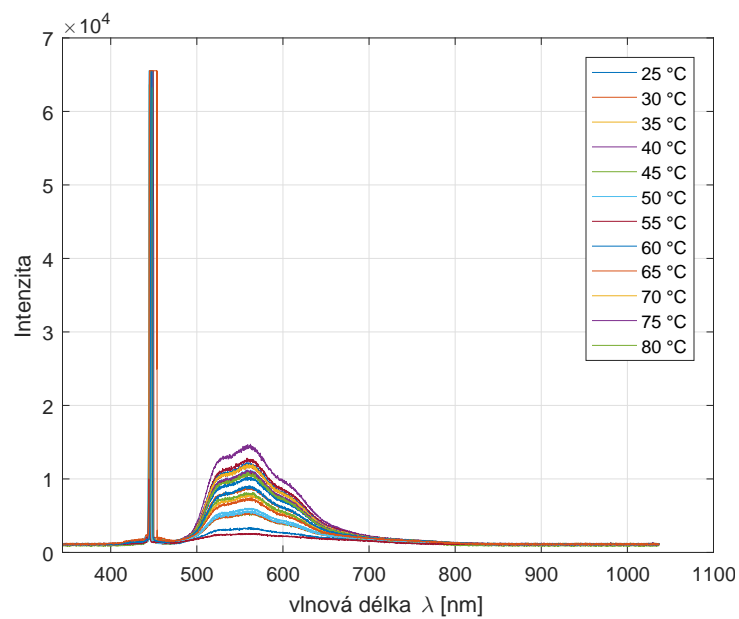
Obrázek 8.46: Teplota chromatičnosti po prudkém ochlazení vzorku



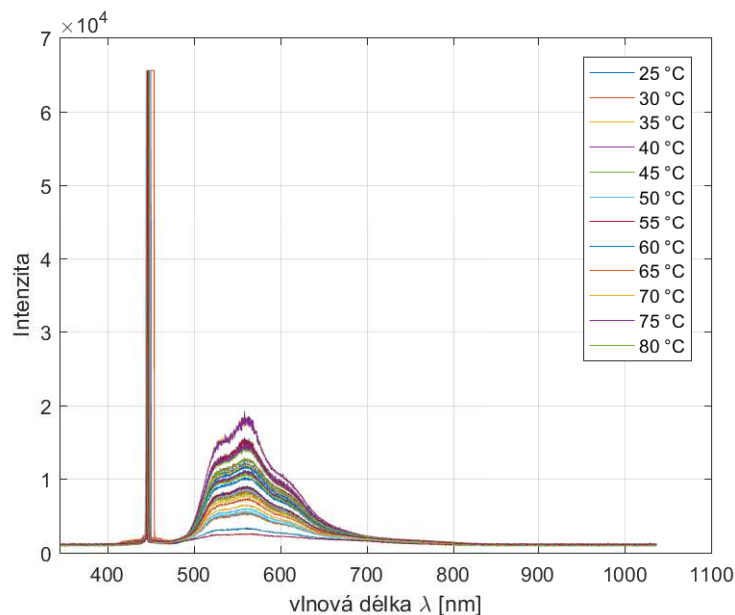
Obrázek 8.47: Index podání barev před a po prudkém ochlazení vzorku



Obrázek 8.48: Teplota chromatičnosti před a po prudkém ochlazení vzorku



Obrázek 8.49: Spektrální charakteristika zahřívání vzorku



Obrázek 8.50: Spektrální charakteristika po prudkém ochlazení vzorku

#### 8.2.4 Opakované namáhání vzorku po určité době

Z naměřených výsledků v tabulce 8.40 je vidět, že index podání barev při prvním zahřívání vzorku se průměrně pohyboval na hodnotě **65,616**. Nejvyšší nárůst  $R_a$  je z 65 °C (**63,311**) na 70 °C (**73,15**), kde  $R_a$  vzrostlo o **9,838**.  $R_a$  na 25 °C je nejvyšší naměřená hodnota (**75,79**) a nejmenší naměřená hodnota je v následujícím kroku při 30 °C (**61,08**). Průběh indexu podání barev závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.51. Teplota chromatičnosti je průměrně na **4691,644K**. Průběh teploty chromatičnosti v závislosti na teplotě je téměř konstantní vyjma 25 °C, kde  $T_c$  mělo nejvyšší hodnotu (**7983,1K**) a následně kleslo o **3697K** na **4286,1K**. Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.52.

Při druhém teplotním namáhání vzorku se index podání barev rapidně nezměnil v porovnání s prvním namáháním vzorku. Průměrné  $R_a$  bylo **65,89426**, to je o **0,27**  $R_a$  více než při prvním zahřívání. Nejmenší  $R_a$  bylo naměřeno na 25 °C (**60,78**) a nejvyšší na 75 °C (**80,76**). Tyto naměřená data lze vidět v grafu 8.53. Průměrná teplota chromatičnosti při druhém teplotním namáhání podle tabulky 8.41 je **4654,024K** (o **37,62K** méně než při prvním namáhání). Nejvyšší naměřená  $T_c$  při 40 °C (**5870,33K**) a nejnižší při 45 °C (**4254,9K**), takže  $T_c$  se pohybuje v rozmezí **1615,433K**. Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě při ochlazování je graficky znázorněn na grafu 8.54.

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	75,79	7983,1
30	61,08	4286,1
35	62,02	4298,1
40	63,1	4309,4
45	64,2	4332,3
50	66,48	4382,1
55	64,31111	4310,556
60	66,68889	4399,222
65	63,31111	4299,444
70	73,15	5121,3
75	62,02222	4274
80	65,24444	4304,111

Tabulka 8.40: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při prvním zahřívání vzorku

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	60,78889	4275,22222
30	62,04444	4259,33333
35	69,19	5804
40	69,57778	5870,33333
45	62,98	4254,9
50	62,77	4256,5
55	62,96	4258,3
60	64,83	4272,7
65	63,74	4273,9
70	63,9	4279
75	80,76	5706,9
80	67,19	4337,2

Tabulka 8.41: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při druhém zahřívání vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda$ [nm]	Intenzita [-]	$\lambda$ [nm]
25	61516,89	445,23	5121,97	556,13
30	63218,75	447,13	12939,07	558,37
35	65535	446,92	11646,8	558,37
40	64230,44	447,13	10565,47	557,96
45	51602,67	446,92	9518,96	559,39
50	52378,85	446,92	7929,74	560,41
55	55741,61	447,35	9494,38	559,59
60	56319,14	446,5	7794,57	558,37
65	55465,14	447,56	9967,46	562,86
70	43810,15	445,65	5605,29	559,19
75	65535	448,19	11695,95	558,37
80	64373,8	447,35	8968,06	558,37
<b>Průměr</b>	<b>58310,62</b>	<b>446,9042</b>	<b>9270,643</b>	<b>558,9483</b>

Tabulka 8.42: Maximální naměřené hodnoty ve spektru po prvním namáhání vzorku

V tabulce 8.42 lze vidět, že při zahřívání naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **58310,6** a daná  $\lambda$  na **446,904 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 25 °C (**445,23 nm**) a nejvyšší na 75 °C (**448,19 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 75 °C s rozdílem **2,96 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 70 a 75 °C, kde na 75 °C byla  $\lambda$  větší o **2,54 nm**. To lze vidět v tabulce 8.44. V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **9270,64** a daná  $\lambda$  na **558,948 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 25 °C (**556,13 nm**) a nejvyšší na 65 °C (**562,86 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 65 °C s rozdílem **6,73 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 60 a 65 °C, kde na 65 °C byla  $\lambda$  větší o **4,49 nm**.

V tabulce 8.43 lze vidět, že po druhém teplotním namáhání naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **61965,2** a daná  $\lambda$  na **447,768 nm**, to je o **0,864 nm** více než při prvním zahřívání. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 25 °C (**447,13 nm**) a nejvyšší na 40 °C (**449,04 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 40 °C s rozdílem **1,91 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 70 a 75 °C, kde na 75 °C byla  $\lambda$  menší o **2,54 nm**. To lze vidět v tabulce 8.45. V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **9950,23** a daná  $\lambda$  na **560,903 nm**, to je o **1,95 nm** více než při prvním namáhání. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 45 °C (**558,37 nm**) a nejvyšší na 25 °C (**563,87 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 55 °C s rozdílem **-4,89 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 40 a 45 °C, kde na 45 °C byla  $\lambda$  menší o **4,49 nm**.

Integrační čas pro měření postupného zvyšování teploty bylo automaticky nastaveno na **5481  $\mu$ s**. Spektrální charakteristiky těchto naměřených hodnot lze vidět na obrázcích 8.57 a 8.58.

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	65535	447,13	13283,13	563,87
30	65535	447,98	11521,87	563,47
35	65535	447,56	10420,06	560,21
40	65535	449,04	10231,65	562,86
45	65535	447,77	10745,69	558,37
50	65535	448,4	10741,6	561,02
55	65535	448,19	10610,53	558,98
60	65535	447,35	9123,7	561,23
65	65535	448,4	10123,11	559,8
70	59286,65	447,98	10372,96	561,02
75	32937,48	445,44	3981,25	560,41
80	61543,51	447,98	8247,17	559,59
<b>Průměr</b>	<b>61965,22</b>	<b>447,768333</b>	<b>9950,227</b>	<b>560,9025</b>

Tabulka 8.43: Maximální naměřené hodnoty ve spektru po druhém namáhání vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	1,9	1,9	2,24	2,24
35	1,69	-0,21	2,24	0
40	1,9	0,21	1,83	-0,41
45	1,69	-0,21	3,26	1,43
50	1,69	0	4,28	1,02
55	2,12	0,43	3,46	-0,82
60	1,27	-0,85	2,24	-1,22
65	2,33	1,06	6,73	4,49
70	0,42	-1,91	3,06	-3,67
75	2,96	2,54	2,24	-0,82
80	2,12	-0,84	2,24	0

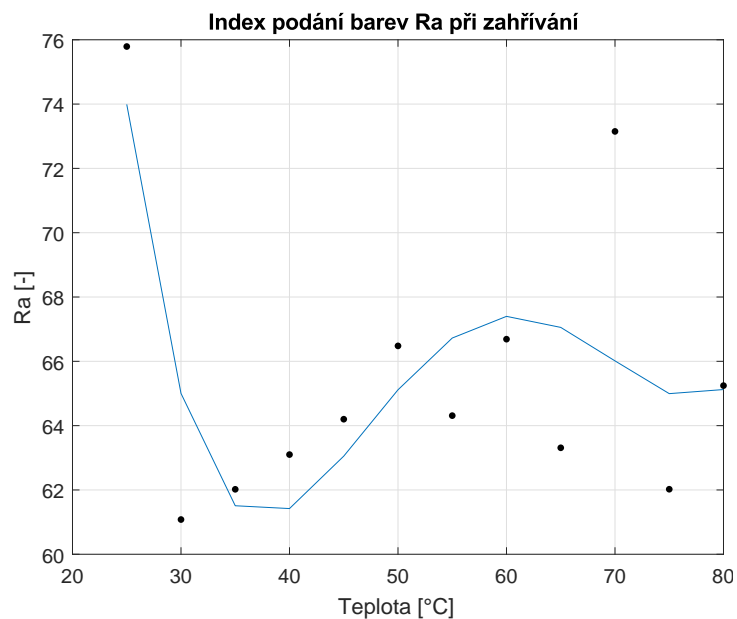
Tabulka 8.44: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po prvním namáhání vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	0,85	0,85	-0,4	-0,4
35	0,43	-0,42	-3,66	-3,26
40	1,91	1,48	-1,01	2,65
45	0,64	-1,27	-5,5	-4,49
50	1,27	0,63	-2,85	2,65
55	1,06	-0,21	-4,89	-2,04
60	0,22	-0,84	-2,64	2,25
65	1,27	1,05	-4,07	-1,43
70	0,85	-0,42	-2,85	1,22
75	-1,69	-2,54	-3,46	-0,61
80	0,85	2,54	-4,28	-0,82

Tabulka 8.45: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po druhém namáhání vzorku

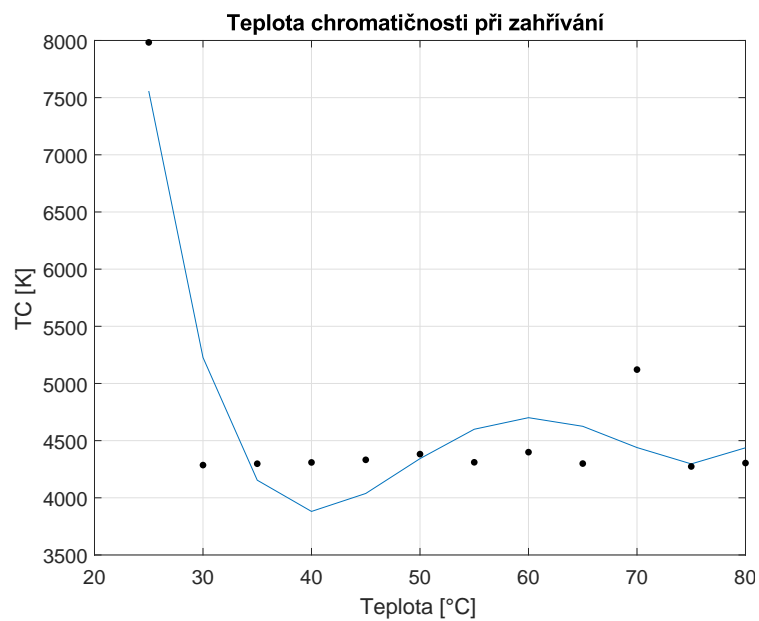
kde,  $\Delta_{25}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 25 °C

$\Delta_{předchozí}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě

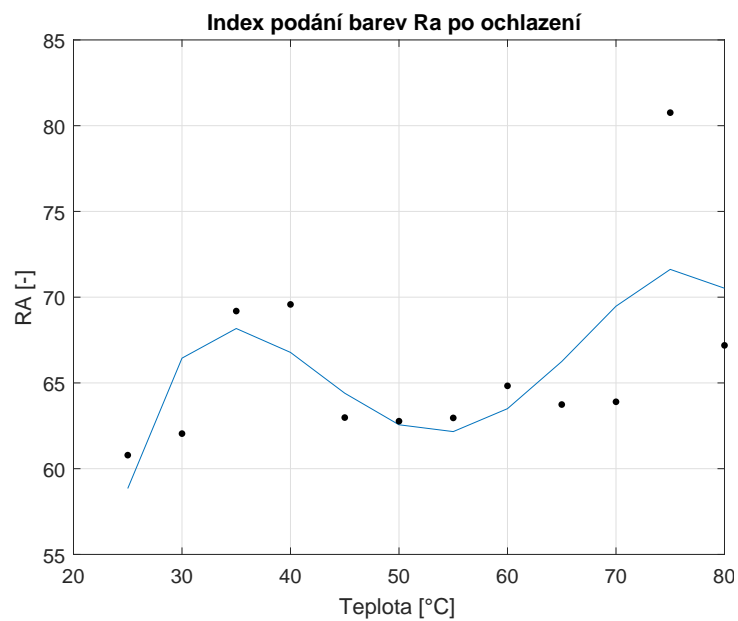


Obrázek 8.51: Index podání barev po prvním namáhání vzorku

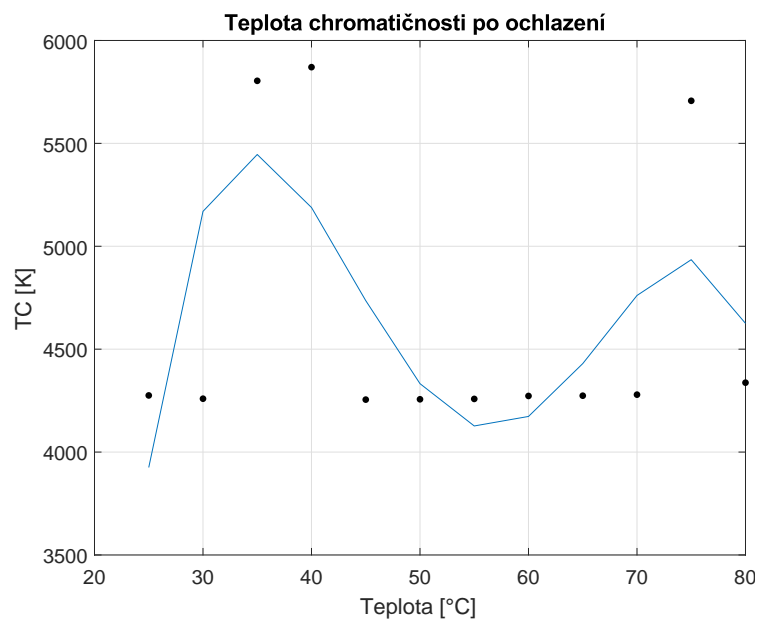




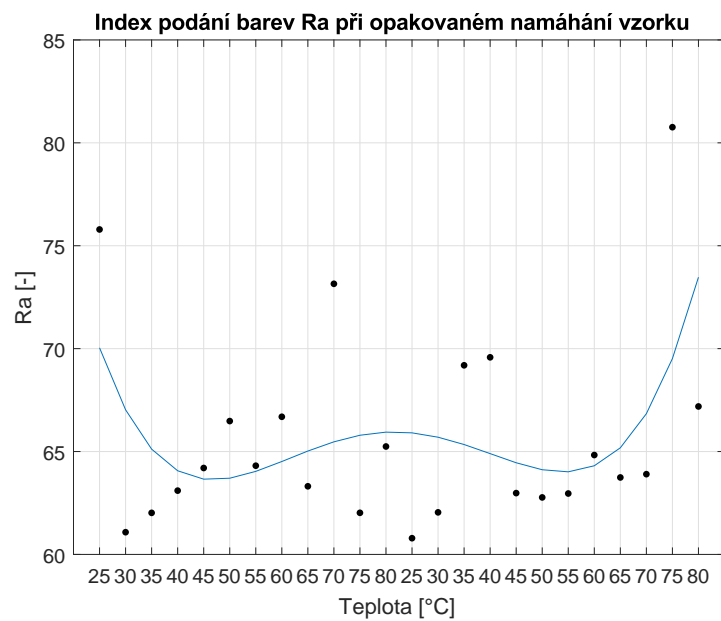
Obrázek 8.52: Teplota chromatičnosti po prvním namáhání vzorku



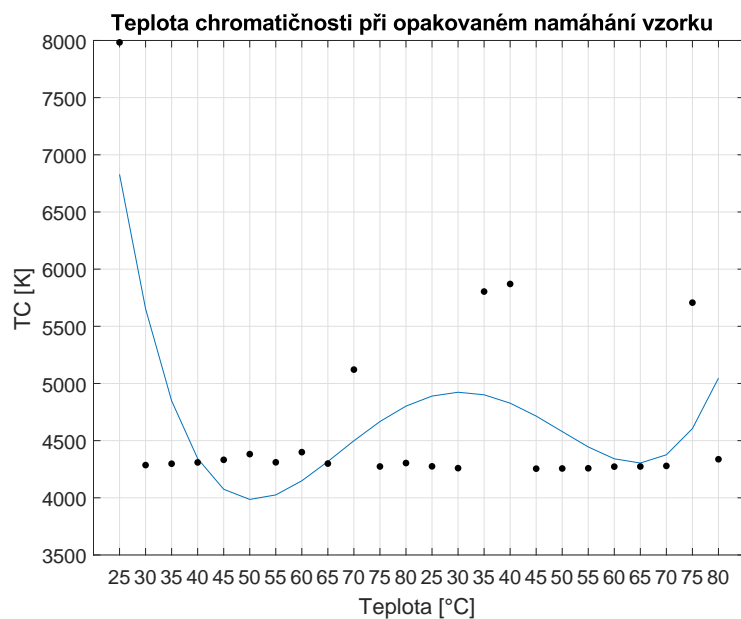
Obrázek 8.53: Index podání barev po druhém namáhání vzorku



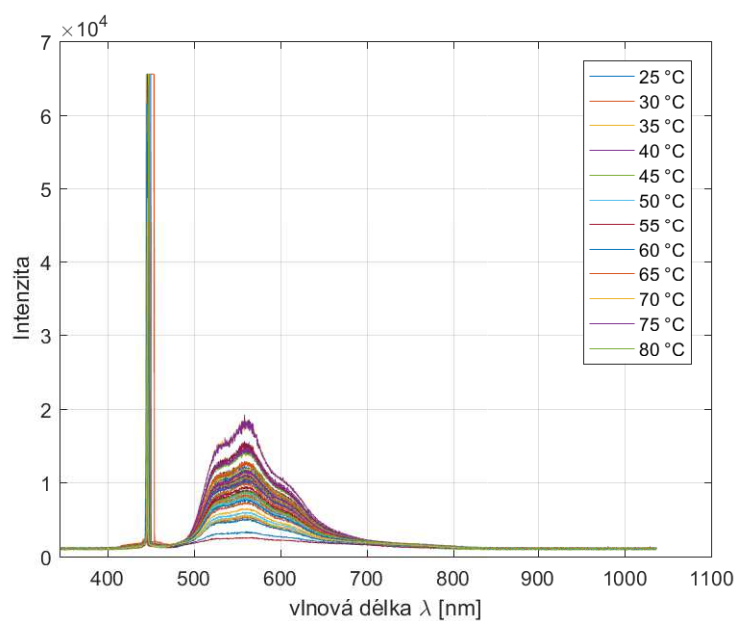
Obrázek 8.54: Teplota chromatičnosti po druhém namáhání vzorku



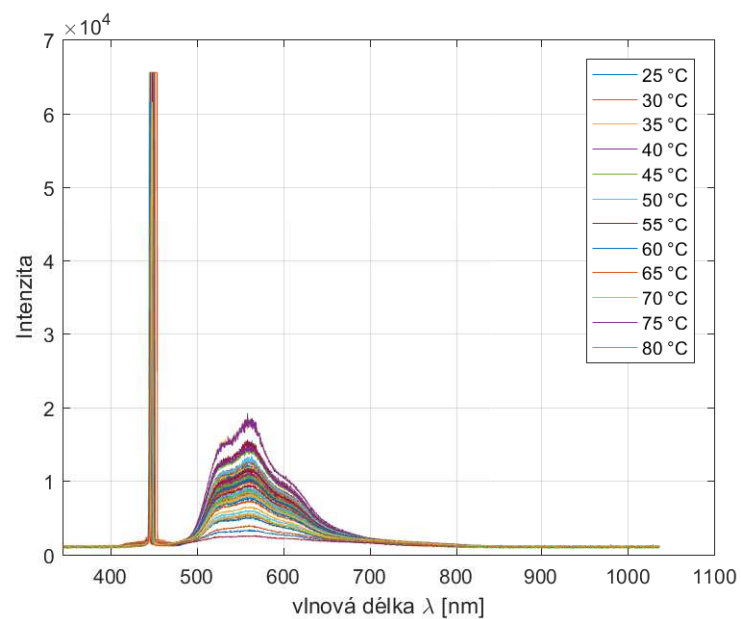
Obrázek 8.55: Index podání barev při opakovaném namáhání vzorku



Obrázek 8.56: Teplota chromatičnosti při opakovaném namáhání vzorku



Obrázek 8.57: Spektrální charakteristika prvního namáhání vzorku



Obrázek 8.58: Spektrální charakteristika druhého namáhání vzorku

### 8.2.5 Shrnutí naměřených hodnot

V tabulce 8.46 jsou shrnuty průměrné naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti vzorků s koncentrací luminoforu 1:50. Jde vidět, že v prvním typu měření (postupné zvyšování teploty) je index podání barev maximální naměřenou hodnotou (**75,66**). V dalších typech měření se index podání barev ustálil na průměrných **66,55**. Teplota chromatičnosti před ochlazením vzorku má průměrnou hodnotu **5066,576 K**, kde naměřené teploty chromatičnosti jsou si velmi podobné a není zde žádný razantní nárůst nebo pokles s porovnáním s ostatními typy měření před ochlazením. Index podání barev po ochlazení je průměrně vyšší o **1,08**, kde maximální naměřený index podání barev je při měření pozvolného ochlazování (**73,493**) a nejmenší u opakovaného namáhání (**67,6415**). Průměrná teplota chromatičnosti po ochlazení je **5114,166 K** a nejvyšší průměrná teplota chromatičnosti je při měření pozvolného ochlazování (**5773,182 K**) a nejnižší u opakovaného namáhání (**4654,024 K**), to je rozdíl o **1119,158 K** mezi maximem a minimem. Co se týče porovnání výsledků před ochlazením a po ochlazení, tak u indexu podání barev je nejvyšším rozdílem při měření pozvolného ochlazování, kde po ochlazení je index podání barev vyšší o **5,73**. V dalších typech měření jsou si indexy velmi podobné. Při měření pozvolného ochlazování je teplota chromatičnosti po ochlazení vyšší o **1313,27 K** a u měření prudkého ochlazení je teplota chromatičnosti před ochlazením vyšší o **1000,791 K**.

Typ měření	Před ochlazením		Po ochlazení	
	Ra [-]	Tc [K]	Ra [-]	Tc [K]
Postupné zvyšování teploty	75,66	5198,817	-	-
Pozvolné ochlazování	67,74	4459,91	73,493	5773,182
Prudké ochlazení	66,317	5915,933	63,5375	4915,142
Opakované namáhání	65,616	4691,644	65,894	4654,024

Tabulka 8.46: Průměrné naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti pro koncentraci vzorku 1:50

V tabulce 8.47 jsou shrnuty průměrné naměřené hodnoty intenzity a maximální vlnové délky vzorků s koncentrací luminoforu 1:50 v modrém světle. Naměřené maximální vlnové délky jsou si velmi podobné, kde před ochlazením nejvyšší rozdíl je o **1,21 nm**. Průměrná  $\lambda$  před ochlazením je **446,8213 nm**. Po ochlazení jsou si hodnoty taktéž velmi podobné. Průměrná  $\lambda$  po ochlazení je **446,6894 nm**, to je o **0,13 nm** méně než před ochlazením. Nejvyšší rozdíl po ochlazení je při měření opakovaného namáhání (o **0,86 nm** více po ochlazení).

Typ měření	Modré světlo			
	Před ochlazením		Po ochlazení	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
Postupné zvyšování teploty	59418,06	447,2767	-	-
Pozvolné ochlazování	45627,04	446,0592	61874,72	445,7481
Prudké ochlazení	58219,66	447,045	65506,84	446,55
Opakované namáhání	58310,62	446,9042	61965,22	447,77

Tabulka 8.47: Průměrné naměřené hodnoty modrého světla intenzity a  $\lambda$  pro koncentraci vzorku 1:50

V tabulce 8.48 jsou shrnuty průměrné naměřené hodnoty intenzity a maximální vlnové délky vzorků s koncentrací luminoforu 1:50 v širokopásmovém světle. Maximální  $\lambda$  před ochlazením je průměrně **560,7038 nm**, kde nejvyšší rozdíl je mezi měřením pozvolného ochlazování (**562,2 nm**) a opakovaného namáhání (**558,94 nm**) o **3,26 nm**. Po ochlazení jsou naměřené hodnoty opět velmi podobné. Průměrná maximální  $\lambda$  je **560,33 nm**, to je o **0,36 nm** méně než před ochlazením. Nejvyšším rozdílem v porovnání mezi sebou je při měření pozvolného ochlazování, kde před ochlazením je  $\lambda$  vyšší o **2,95 nm**.

Typ měření	Širokopásmové světlo			
	Před ochlazením		Po ochlazení	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
Postupné zvyšování teploty	11088,73	560,961	-	-
Pozvolné ochlazování	12321,26	562,2083	8874,407	559,2582
Prudké ochlazení	9433,798	560,6975	12969,61	560,85
Opakované namáhání	9270,643	558,9483	9950,22	560,9

Tabulka 8.48: Průměrné naměřené hodnoty širokopásmového světla intenzity a  $\lambda$  pro koncentraci vzorku 1:50

## 8.3 Vzorek s koncentrací luminoforu 1:100

### 8.3.1 Postupné zvyšování teploty

Z naměřených výsledků v tabulce 8.49 je vidět, že index podání barev se pohyboval od **67,69** do **88,62**. Nejvyšší naměřené Ra je při 70 °C a nejmenší při 50 °C. Jediný větší nárůst Ra v tomto měření byl na 70 °C (**88,62**) a v následujícím kroku Ra kleslo o **16,38**. Průměrné Ra při postupném zvyšování teploty je **74,44**. Průběh indexu podání barev závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.59.

Teplota chromatičnosti je průměrně na **8881,47K**. Nejvyšší naměřená teplota chromatičnosti je na 35 °C (**18723,2K**) a nejmenší naměřená hodnota při 50 °C (**5336,6K**). Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.60.

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	77,37	8625,1
30	74,58	9095,3
35	77,46	18723,2
40	79,25	14384,6
45	71,17	6304
50	67,69	5336,6
55	69,32	5857,7
60	70,63	6023,9
65	70,15	5792,1
70	88,62	7254,8
75	72,24	5852,9
80	74,8	13327,44

Tabulka 8.49: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti

V tabulce 8.50 lze vidět, že naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **59461,01** a daná  $\lambda$  na **445,4942 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 25 °C (**443,96 nm**) a nejvyšší na 60 °C (**447,77**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 60 °C s rozdílem **3,81 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 55 a 60 °C, kde na 60 °C byla  $\lambda$  větší o **2,96 nm**. To lze vidět v tabulce 8.51.

V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **5179,177** a daná  $\lambda$  na **561,3425 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 35 °C (**557,96 nm**) a nejvyšší na 60 °C (**563,47 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 35 °C s rozdílem **-4,28 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 35 a 40 °C, kde na 40 °C byla  $\lambda$  větší o **6,32 nm**. Integrační čas pro měření postupného zvyšování teploty bylo automaticky nastaveno na **3800  $\mu$ s**. Spektrální charakteristiku těchto naměřených hodnot lze vidět na obrázku 8.61.

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	65535	443,96	11421,52	562,24
30	65535	445,65	4488,74	558,37
35	43076,77	444,59	2449,99	557,96
40	42394,18	444,38	2378,92	564,28
45	65535	447,35	8708,99	558,37
50	65535	446,29	6144,93	562,24
55	65535	444,81	3573,91	562,24
60	65535	447,77	9476,77	563,47
65	65535	445,65	4213,9	559,59
70	65535	445,86	4642,95	562,86
75	55289,83	444,81	2422,13	563,26
80	48491,39	444,81	2227,37	561,23
<b>Průměr</b>	<b>59461,01</b>	<b>445,4942</b>	<b>5179,177</b>	<b>561,3425</b>

Tabulka 8.50: Maximální naměřené hodnoty ve spektru při postupném zvyšování teploty

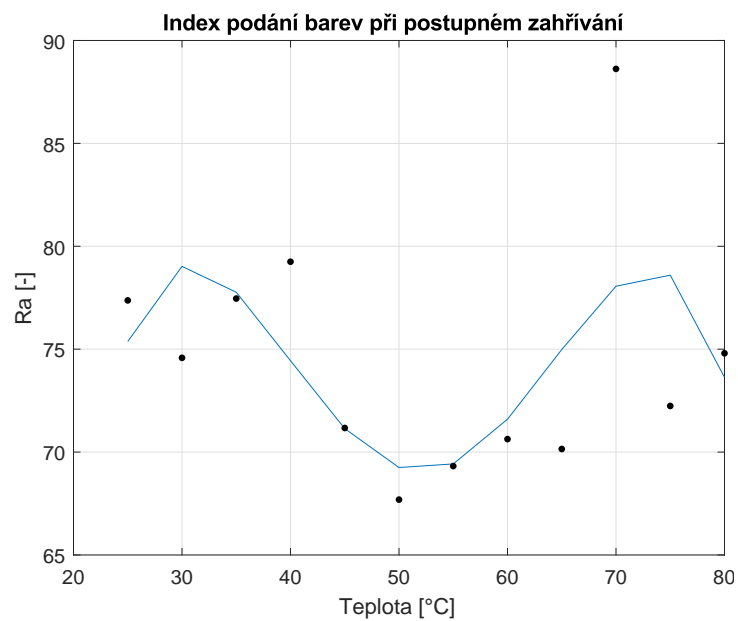
Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	1,69	1,69	-3,87	-3,87
35	0,63	-1,06	-4,28	-0,41
40	0,42	-0,21	2,04	6,32
45	3,39	2,97	-3,87	-5,91
50	2,33	-1,06	0	3,87
55	0,85	-1,48	0	0
60	3,81	2,96	1,23	1,23
65	1,69	-2,12	-2,65	-3,88
70	1,9	0,21	0,62	3,27
75	0,85	-1,05	1,02	0,4
80	0,85	0	-1,01	-2,03

Tabulka 8.51: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek

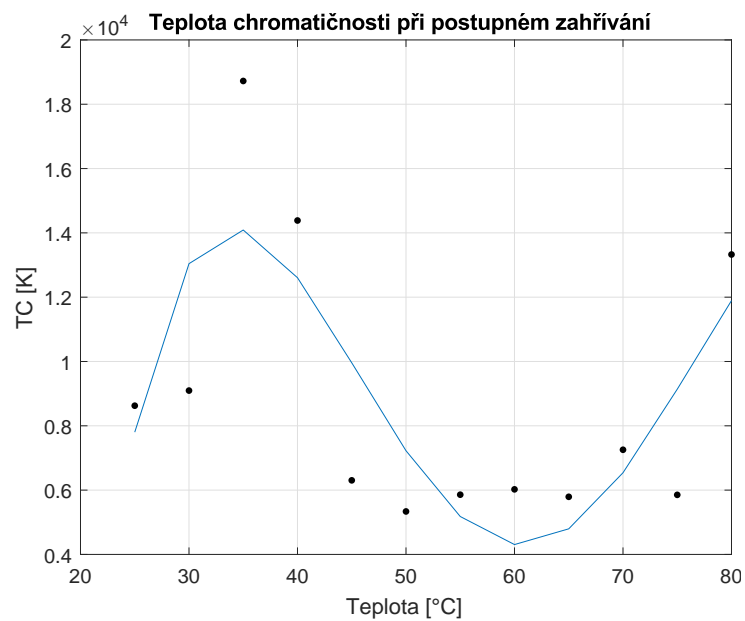
kde,  $\Delta_{25}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 25 °C

$\Delta_{předchozí}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě

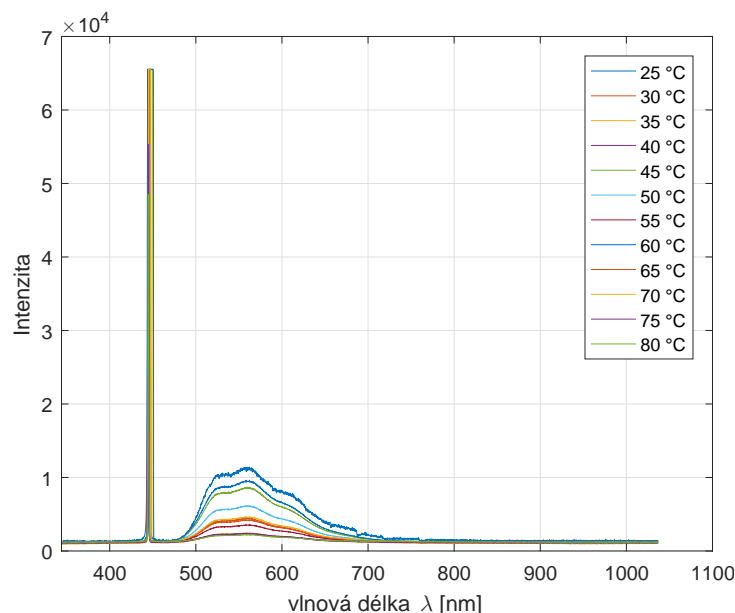




Obrázek 8.59: Index podání barev při postupném zahřívání



Obrázek 8.60: Teplota chromatičnosti při postupném zahřívání



Obrázek 8.61: Spektrální charakteristika měření zvyšování teploty

### 8.3.2 Pozvolné ochlazování

Z naměřených výsledků v tabulce 8.52 je vidět, že index podání barev při zahřívání vzorku se pohyboval mezi **67,13** a **79,36** Ra. Maximum bylo naměřeno při 35 °C a minimum při 50 °C. Z grafu na obrázku 8.62 lze vidět, že křivka Ra spíše klesala a od 65 °C vzrostlo Ra na konečných **74,33**. Průměrná naměřený index podání barev je **72,551**. Teplota chromatičnosti se průměrně pohybovala na hodnotě **12036,53K**, kde na teplotě 35 °C bylo naměřené maximum **40234,3K**, tato Tc představovala také jako jediný velký nárůst Tc v tomto měření. Minimální teplota chromatičnosti byla naměřena na 50 °C (**6059,842K**). Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.63.

Při ochlazování vzorku průměrný index podání barev byl na hodnotě **72,5188**, to je o **0,03** méně než při zahřívání vzorku. Maximum bylo naměřeno na 35 °C (**79,64**) a minimum na 75 °C (**65,82**). V tomto případě křivka grafu vypadá mnohem konstatněji než při zahřívání, jelikož tu nejsou žádné extrémní nárůsty mezi jednotlivými teplotami. Graf lze vidět na obrázku 8.64. Průměrná teplota chromatičnosti při ochlazování podle tabulky 8.53 je **10963,74K**. Nejvyšší naměřená Tc je při 50 °C (**32815,25K**) a nejnižší při 75 °C (**5817,9K**), takže Tc se pohybuje v rozmezí **26997,35K**. Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě při ochlazování je graficky znázorněn na grafu 8.65.

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	73,64	10053,6
30	71,388889	7268,889
35	79,36	40234,3
40	68,888889	6885,444
45	75,65	10898,33
50	67,136842	6059,842
55	73,05	7405,8
60	68,24	6478
65	69,34	7230,6
70	74,57	15675,3
75	74,914286	15245,5
80	74,433333	11002,75

Tabulka 8.52: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při zahřívání vzorku

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
75	65,82	5817,9
70	71,01	7708,5
65	70,55	7439,5
60	66,94	5905,9
55	73,74	8141,9
50	78,98571	32815,25
45	67,66667	6053,111
40	70,8	6826,889
35	79,64444	20447,67
30	76,65	10092,13
25	75,9	9352,444

Tabulka 8.53: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při ochlazování vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	65535	448,83	15193,88	558,37
30	65535	447,56	21434,04	562,24
35	65535	447,56	20276,94	559,59
40	65535	447,98	14438,18	557,96
45	65535	447,13	14475,04	558,17
50	65535	446,29	29132,36	560,61
55	65535	446,5	8003,46	558,37
60	65535	447,77	21860,02	559,59
65	65535	447,77	18151,15	558,37
70	65535	448,4	18689,76	558,37
75	65535	446,5	5144,5	558,37
80	65535	445,02	5472,17	561,02
<b>Průměr</b>	<b>65535</b>	<b>447,275833</b>	<b>16022,63</b>	<b>559,2525</b>

Tabulka 8.54: Maximální naměřené hodnoty ve spektru při zahřívání vzorku

V tabulce 8.54 lze vidět, že při zahřívání naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **65535** a daná  $\lambda$  na **447,2758 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 80 °C (**445,02 nm**) a nejvyšší na 25 °C (**448,83 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 80 °C s rozdílem **-3,81 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 70 a 75 °C, kde na 75 °C byla  $\lambda$  menší o **1,9 nm**. To lze vidět v tabulce 8.56. V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **16022,63** a daná  $\lambda$  na **559,2525 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 40 °C (**557,96 nm**) a nejvyšší na 30 °C (**562,24 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 30 °C s rozdílem **3,87 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 25 a 30 °C, kde na 30 °C byla  $\lambda$  větší o **3,87 nm**.

V tabulce 8.55 lze vidět, že při ochlazování naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **65535** a daná  $\lambda$  na **447,2318 nm**, to je o **0,04 nm** méně než při zahřívání. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 40 a 45 °C (**446,08 nm**) a nejvyšší na 70 °C (**449,46 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 75 °C bylo při 70 °C s rozdílem **1,9 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 70 a 65 °C, kde na 65 °C byla  $\lambda$  menší o **2,33 nm**. To lze vidět v tabulce 8.57. V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **23976,69** a daná  $\lambda$  na **559,1855 nm**, to je o **0,06 nm** méně než u zahřívání. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 50 °C (**556,74 nm**) a nejvyšší na 45 a 25 °C (**562,65**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 75 °C bylo při 45 a 25 °C s rozdílem **4,28 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 50 a 45 °C, kde na 45 °C byla  $\lambda$  větší o **5,91 nm**.

Integrační čas pro měření postupného zvyšování teploty bylo automaticky nastaveno na **14220  $\mu s$** . Spektrální charakteristiky těchto naměřených hodnot lze vidět na obrázcích 8.68 a 8.69.

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
75	65535	447,56	33410,56	558,37
70	65535	449,46	18689,76	558,37
65	65535	447,13	19121,88	560,41
60	65535	447,77	29853,24	558,37
55	65535	447,35	18675,43	558,37
50	65535	447,35	18759,39	556,74
45	65535	446,08	27031,14	562,65
40	65535	446,08	26447,47	558,37
35	65535	446,29	23858,84	558,37
30	65535	448,19	23817,88	558,37
25	65535	446,29	24077,97	562,65
<b>Průměr</b>	<b>65535</b>	<b>447,231818</b>	<b>23976,69</b>	<b>559,1855</b>

Tabulka 8.55: Maximální naměřené hodnoty ve spektru při ochlazování vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	-1,27	-1,27	3,87	3,87
35	-1,27	0	1,22	-2,65
40	-0,85	0,42	-0,41	-1,63
45	-1,7	-0,85	-0,2	0,21
50	-2,54	-0,84	2,24	2,44
55	-2,33	0,21	0	-2,24
60	-1,06	1,27	1,22	1,22
65	-1,06	0	0	-1,22
70	-0,43	0,63	0	0
75	-2,33	-1,9	0	0
80	-3,81	-1,48	2,65	2,65

Tabulka 8.56: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek při zahřívání

kde,  $\Delta_{25}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 25 °C

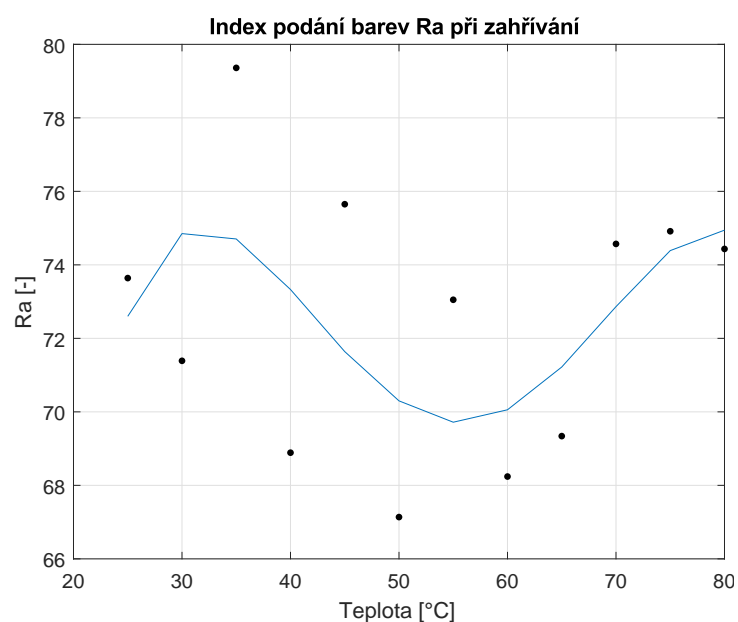
$\Delta_{předchozí}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{75}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{75}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
75	0	0	0	0
70	1,9	1,9	0	0
65	-0,43	-2,33	2,04	2,04
60	0,21	0,64	0	-2,04
55	-0,21	-0,42	0	0
50	-0,21	0	-1,63	-1,63
45	-1,48	-1,27	4,28	5,91
40	-1,48	0	0	-4,28
35	-1,27	0,21	0	0
30	0,63	1,9	0	0
25	-1,27	-1,9	4,28	4,28

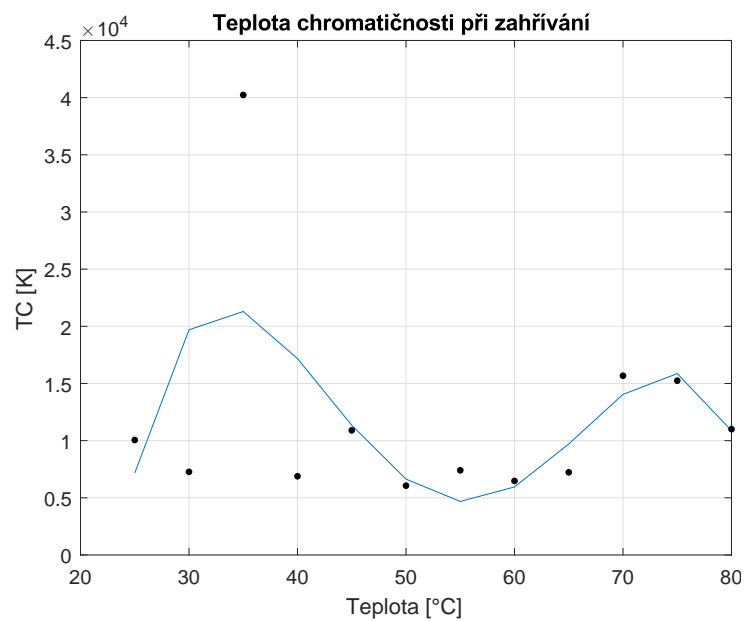
Tabulka 8.57: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek při ochlazování

kde,  $\Delta_{75}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 75 °C

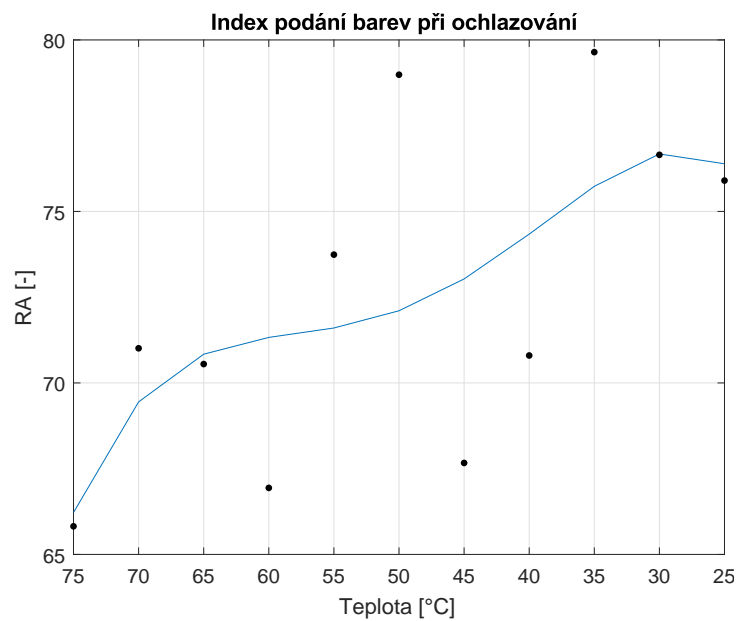
$\Delta_{předchozí}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě



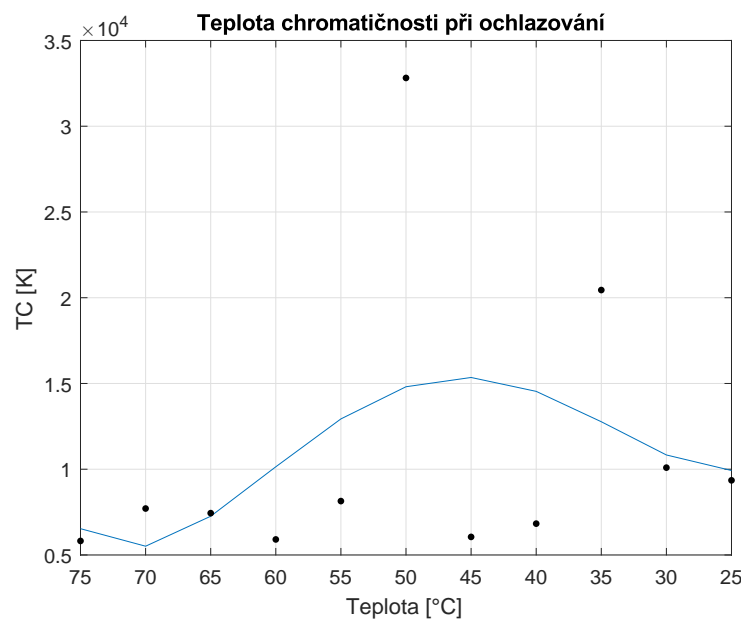
Obrázek 8.62: Index podání barev při zahřívání vzorku



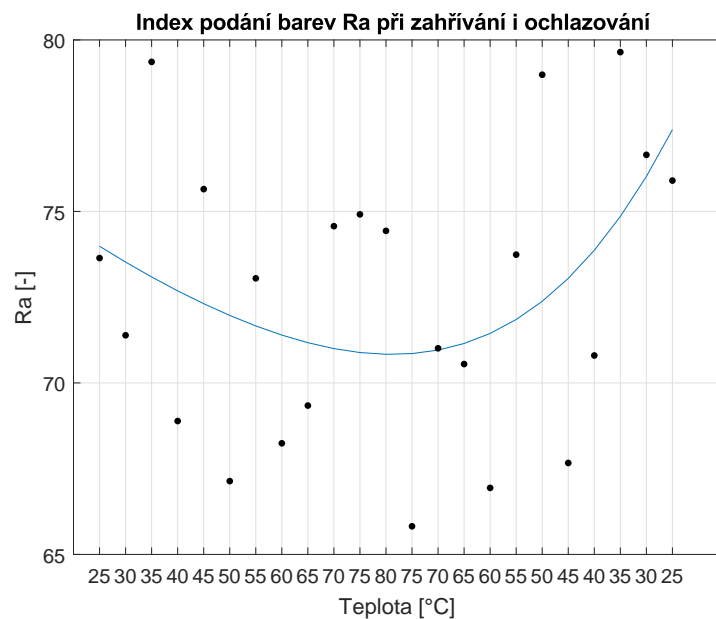
Obrázek 8.63: Teplota chromatičnosti při zahřívání vzorku



Obrázek 8.64: Index podání barev při ochlazování vzorku

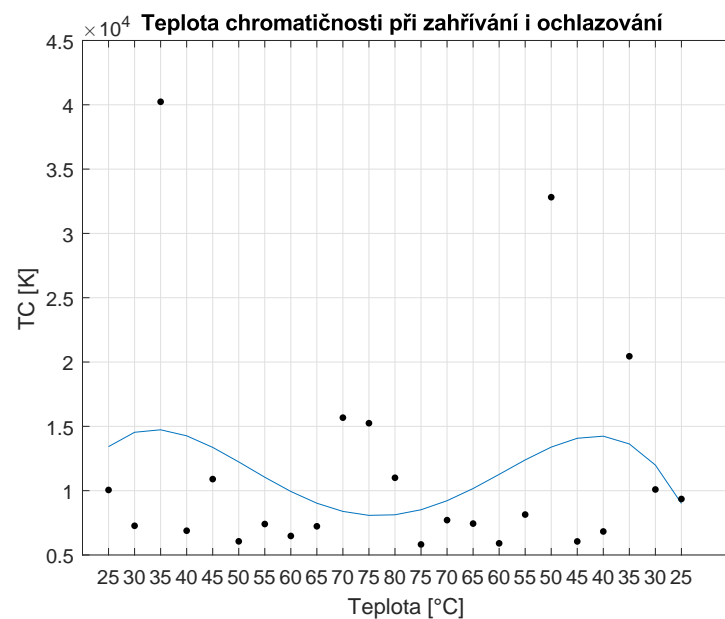


Obrázek 8.65: Teplota chromatičnosti při ochlazování vzorku

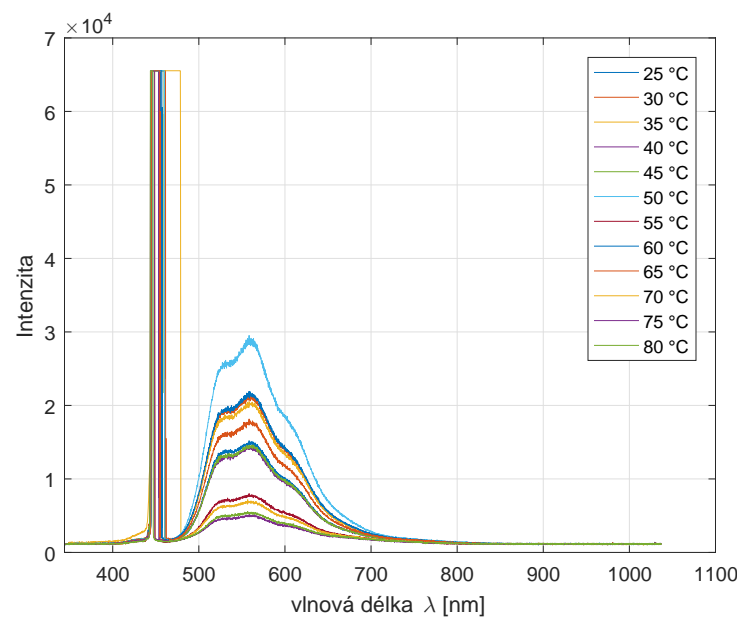


Obrázek 8.66: Index podání barev při zahřívání i ochlazování vzorku

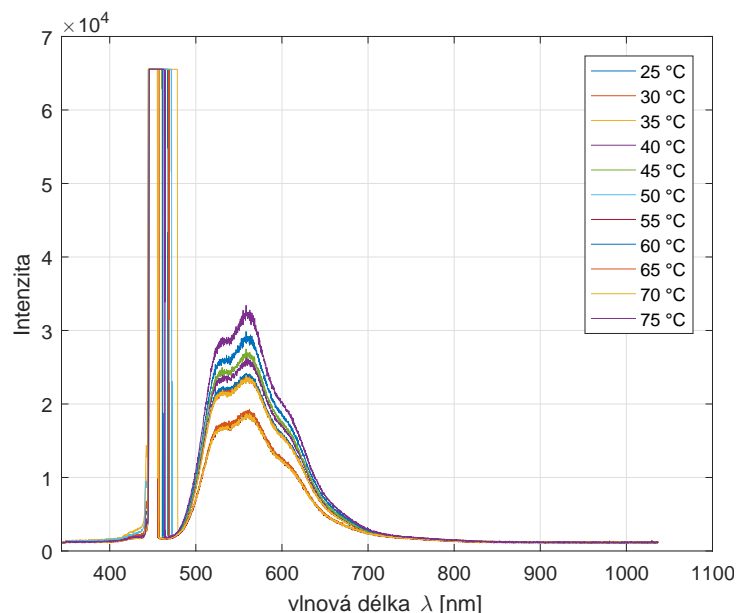




Obrázek 8.67: Teplota chromatičnosti při zahřívání i ochlazování vzorku



Obrázek 8.68: Spektrální charakteristika zahřívání vzorku



Obrázek 8.69: Spektrální charakteristika ochlazování vzorku

### 8.3.3 Prudké ochlazení

Z naměřených výsledků v tabulce 8.58 je vidět, že index podání barev při zahřívání vzorku se průměrně pohyboval na hodnotě **74,07**. Největší naměřená hodnota indexu podání barev je na teplotě 55 °C (**77,1**) a nejmenší na 60 °C (**71,1**). Z naměřeného maxima a minima jde vidět, že hodnoty se pohybují maximálním rozdílem **6 Ra**. Průběh indexu podání barev závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.70. Teplota chromatičnosti je průměrně na **9915,231K**. Průběh teploty chromatičnosti v závislosti na teplotě je téměř konstantní do 55 °C, kde  $T_c$  vzrostlo o **10000K**. Od 55 °C byl střídavý průběh grafu, který jde vidět na grafu 8.71.

Po prudkém ochlazení se index podání barev se moc neodlišoval hodnotami od měření před ochlazením, kde průměrné  $R_a$  bylo **76,87**, to je o **2,79**  $R_a$  více než při zahřívání. Nejmenší  $R_a$  bylo naměřeno na 25 °C (**70,76**) a nejvyšší na 50 °C (**82,78**). Tyto naměřená data lze vidět v grafu 8.72. Průměrná teplota chromatičnosti po prudkém ochlazení podle tabulky 8.59 je **14355,44K** (o **4440,2079K** více než u zahřívání). Nejvyšší naměřená teplota chromatičnosti je při 40 °C (**34926,9K**) a nejnižší při 25 °C (**6444,6K**), takže  $T_c$  se pohybuje v rozmezí **28482,3K**. Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě při ochlazování je graficky znázorněn na grafu 8.73.

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	73,9444444	9033,222
30	71,91	7013,6
35	73,5375	8025,5
40	73,0777778	7172,125
45	72,91	7688,2
50	73,1375	8056,375
55	77,1	18135,25
60	71,1	6658
65	76,5	14584,5
70	75,8	9515
75	74,9333333	14537
80	75	8564

Tabulka 8.58: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při zahřívání

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	70,76	6444,6
30	76,68	8514,7
35	75,66	10619,1
40	78,75	34926,9
45	78,25	16462
50	82,78	14497,7
55	78,5	12908
60	72,08	6883,6
65	78,78	24478,67
70	76,52	12558
75	75	9127
80	78,7	14845

Tabulka 8.59: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti po prudkém ochlazení

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	65535	446,92	30985,77	559,59
30	65535	446,5	40932,75	558,37
35	65535	446,71	38657,46	557,76
40	65535	446,29	45733,19	559,59
45	65535	447,13	33728	555,92
50	65535	447,77	36736,46	562,24
55	65535	446,08	19140,32	558,37
60	65535	448,62	13618,99	561,02
65	65535	447,13	19990,22	562,24
70	65535	447,35	8167,3	557,76
75	65535	447,98	14212,9	558,37
80	65535	446,5	12574,53	562,24
<b>Průměr</b>	<b>65535</b>	<b>447,0817</b>	<b>26206,49</b>	<b>559,4558</b>

Tabulka 8.60: Maximální naměřené hodnoty ve spektru při zahřívání vzorku

V tabulce 8.60 lze vidět, že při zahřívání naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **65535** a daná  $\lambda$  na **447,0817 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 55 °C (**446,08 nm**) a nejvyšší na 60 °C (**448,62 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 60 °C s rozdílem **1,7 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 55 a 60 °C, kde na 60 °C byla  $\lambda$  větší o **2,54 nm**. To lze vidět v tabulce 8.62. V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **26206,49** a daná  $\lambda$  na **559,4558 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 45 °C (**555,92 nm**) a nejvyšší na 65 a 80 °C (**562,24 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 45 °C s rozdílem **-3,67 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 65 a 70 °C, kde na 70 °C byla  $\lambda$  menší o **4,48 nm**.

V tabulce 8.61 lze vidět, že po prudkém ochlazení naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **65535** a daná  $\lambda$  na **446,905 nm**, to je o **0,176 nm** méně než při zahřívání. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 65 °C (**446,08 nm**) a nejvyšší na 75 °C (**447,98 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 65 °C s rozdílem **-1,27 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 60 a 65 °C, kde na 65 °C byla  $\lambda$  menší o **1,48 nm**. To lze vidět v tabulce 8.63. V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **23682,03** a daná  $\lambda$  na **560,5625 nm**, to je o **1,106 nm** méně než před ochlazením. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 65 °C (**556,33 nm**) a nejvyšší na 80 °C (**563,47**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 65 °C s rozdílem **-6,53 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 65 a 70 °C, kde na 70 °C byla  $\lambda$  větší o **6,53 nm**.

Integrační čas pro měření postupného zvyšování teploty bylo automaticky nastaveno na **14220  $\mu s$** . Spektrální charakteristiky těchto naměřených hodnot lze vidět na obrázcích 8.76 a 8.77.

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	65535	447,35	44748,12	562,86
30	65535	446,71	28055,12	559,59
35	65535	447,13	31116,84	558,37
40	65535	446,92	19175,13	558,37
45	65535	446,5	16764,67	560,21
50	65535	446,71	21374,65	562,24
55	65535	446,71	15783,7	561,84
60	65535	447,56	39642,53	558,37
65	65535	446,08	20035,28	556,33
70	65535	446,71	27496,03	562,86
75	65535	447,98	10911,58	562,24
80	65535	446,5	9080,69	563,47
<b>Průměr</b>	<b>65535</b>	<b>446,905</b>	<b>23682,03</b>	<b>560,5625</b>

Tabulka 8.61: Maximální naměřené hodnoty ve spektru po prudkém ochlazení vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	-0,42	-0,42	-1,22	-1,22
35	-0,21	0,21	-1,83	-0,61
40	-0,63	-0,42	0	1,83
45	0,21	0,84	-3,67	-3,67
50	0,85	0,64	2,65	6,32
55	-0,84	-1,69	-1,22	-3,87
60	1,7	2,54	1,43	2,65
65	0,21	-1,49	2,65	1,22
70	0,43	0,22	-1,83	-4,48
75	1,06	0,63	-1,22	0,61
80	-0,42	-1,48	2,65	3,87

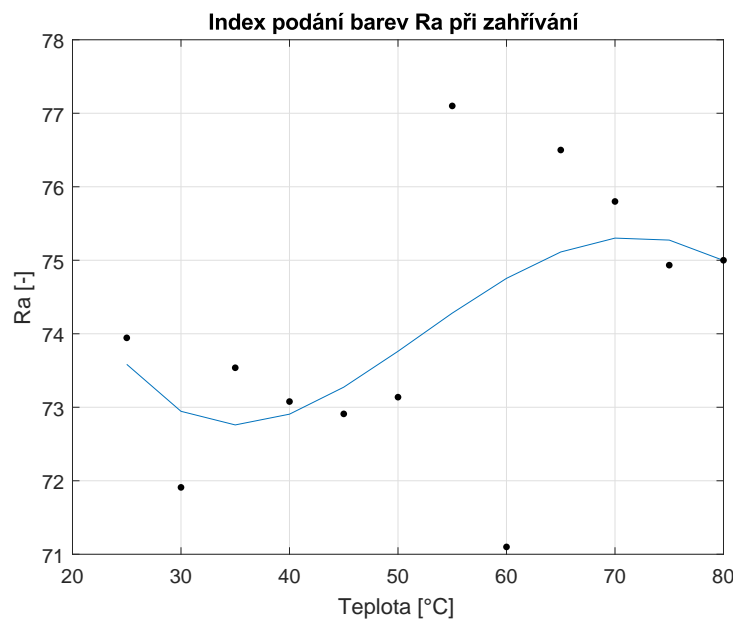
Tabulka 8.62: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek pro zahřívání vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	-0,64	-0,64	-3,27	-3,27
35	-0,22	0,42	-4,49	-1,22
40	-0,43	-0,21	-4,49	0
45	-0,85	-0,42	-2,65	1,84
50	-0,64	0,21	-0,62	2,03
55	-0,64	0	-1,02	-0,4
60	0,21	0,85	-4,49	-3,47
65	-1,27	-1,48	-6,53	-2,04
70	-0,64	0,63	0	6,53
75	0,63	1,27	-0,62	-0,62
80	-0,85	-1,48	0,61	1,23

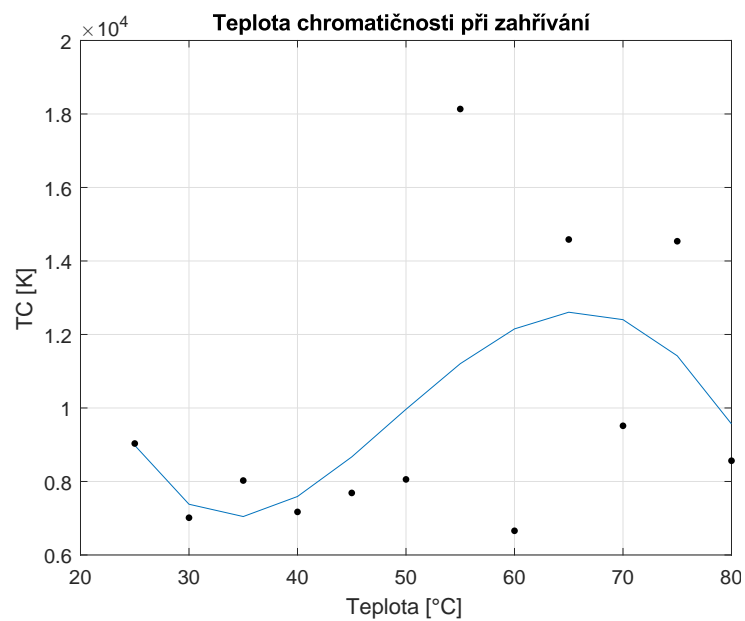
Tabulka 8.63: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po prudkém ochlazení vzorku

kde,  $\Delta_{25}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 25 °C

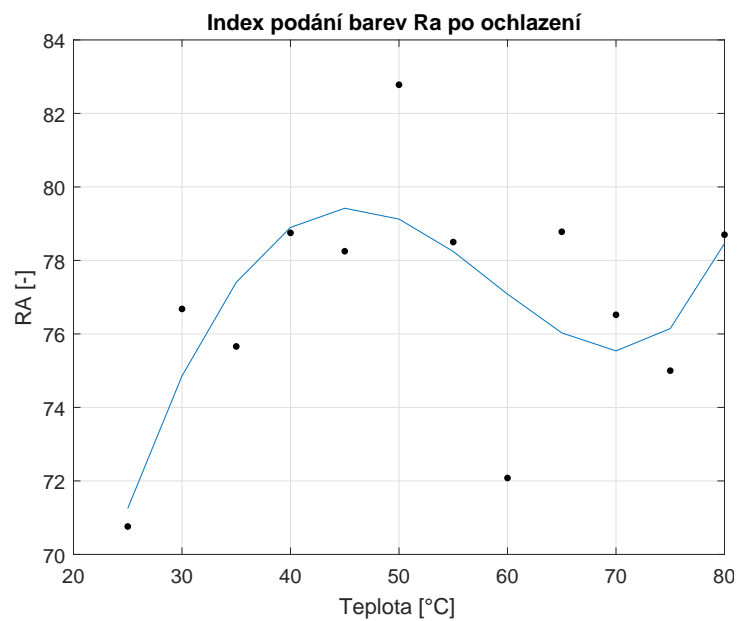
$\Delta_{předchozí}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě



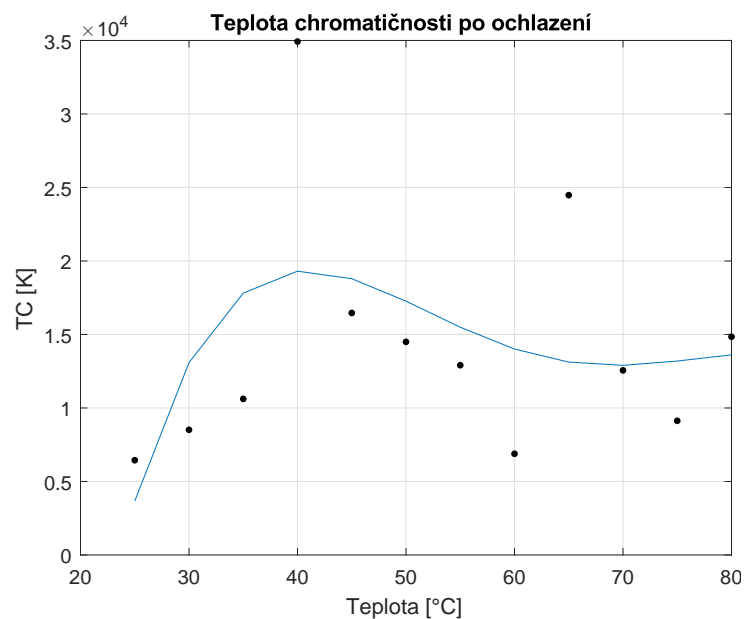
Obrázek 8.70: Index podání barev při zahřívání vzorku



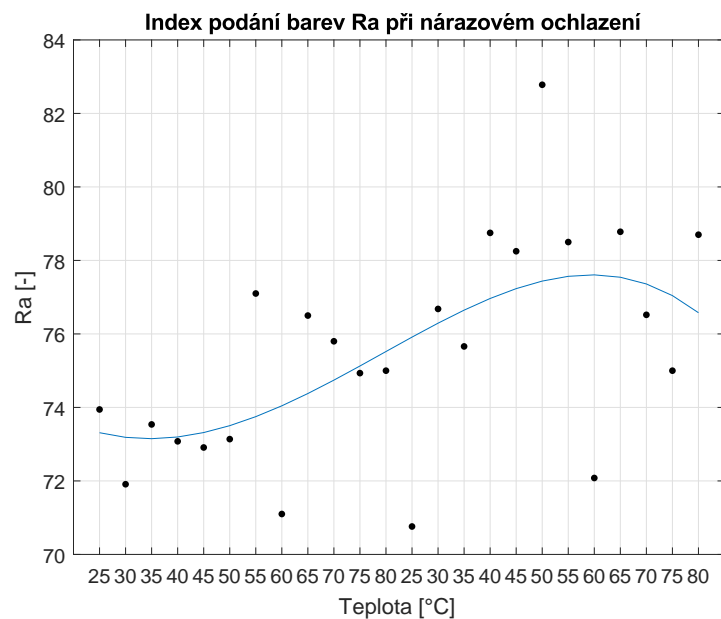
Obrázek 8.71: Teplota chromatičnosti při zahřívání vzorku



Obrázek 8.72: Index podání barev po prudkém ochlazení vzorku

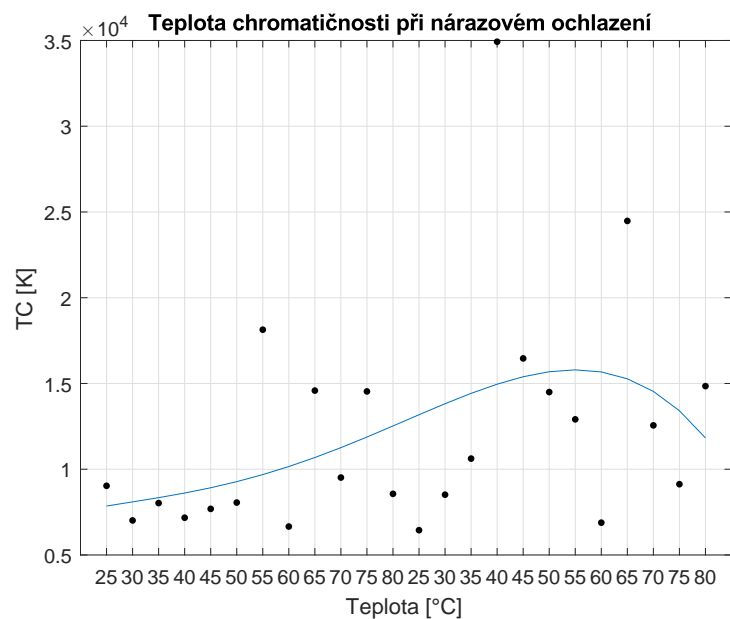


Obrázek 8.73: Teplota chromatičnosti po prudkém ochlazení vzorku

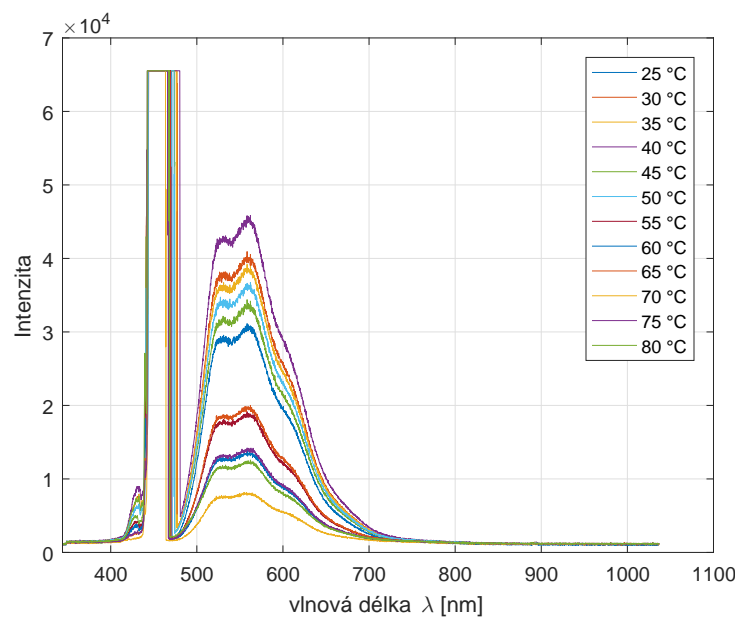


Obrázek 8.74: Index podání barev před a po prudkém ochlazení vzorku

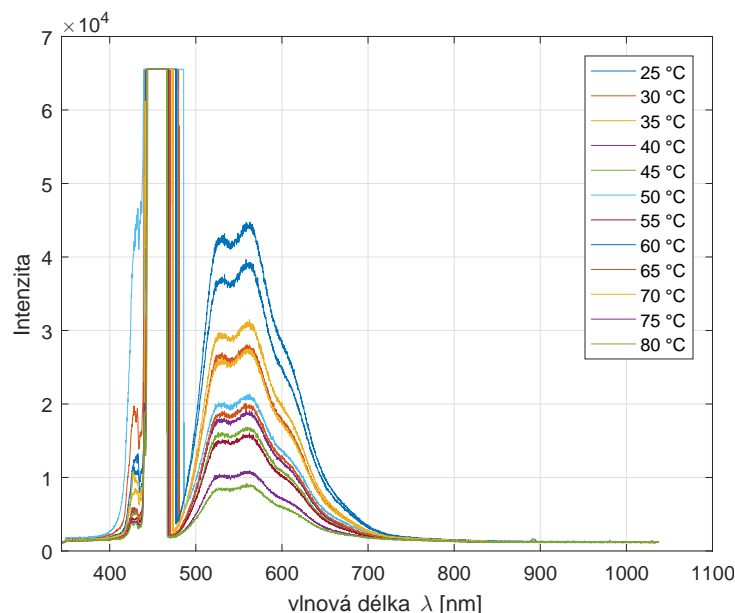




Obrázek 8.75: Teplota chromatičnosti před a po prudkém ochlazení vzorku



Obrázek 8.76: Spektrální charakteristika zahřívání vzorku



Obrázek 8.77: Spektrální charakteristika po prudkém ochlazení vzorku

### 8.3.4 Opakované namáhání vzorku po určité době

Z naměřených výsledků v tabulce 8.64 je vidět, že index podání barev při prvním zahřívání vzorku se průměrně pohyboval na hodnotě **68,79583**. Index podání barev má rostoucí průběh, kde maximální naměřená hodnota je **71,82** při 80 °C a nejmenší naměřená hodnota je **66,41** při 30 °C. Průběh indexu podání barev závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.78. Teplota chromatičnosti je průměrně na **6980,181K**. Průběh teploty chromatičnosti v závislosti na teplotě je rostoucí jako tomu je u indexu podání barev při 30 °C mělo nejmenší hodnotu (**5802,1K**) a maximální na 80 °C **7839,4K**. Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.79. Při druhém teplotním namáhání vzorku se index podání barev rapidně nezměnil v porovnání s prvním namáháním vzorku. Tedy průběh grafu je taktéž rostoucí, ale má větší střídající se hodnoty. Průměrné Ra bylo **69,58667**, to je o **0,79** Ra více než při prvním zahřívání. Nejmenší Ra bylo naměřeno na 25 °C (**65,07**) a nejvyšší na 65 °C (**74,24**). Tyto naměřená data lze vidět v grafu 8.80. Průměrná teplota chromatičnosti při druhém teplotním namáhání podle tabulky 8.65 je **7412,792K** (o **522,61K** více než při prvním namáhání). Nejvyšší naměřená teplota chromatičnosti je při 65 °C (**11135,2K**) a nejnižší při 25 °C (**5495,9K**), takže teplota chromatičnosti se pohybuje v rozmezí **5639,3K**. Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě při ochlazování je graficky znázorněn na grafu 8.81.

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	66,91	7133,9
30	66,41	5802,1
35	66,68	6264,9
40	67,66	6420,3
45	67,96	6588,3
50	67,86	6351,4
55	68,62	6762,5
60	69,8	7254,4
65	70,9	7825,5
70	69,13	6993,6
75	71,8	7445,875
80	71,82	7839,4

Tabulka 8.64: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při prvním zahřívání vzorku

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	65,07	5495,9
30	67,92	6933,4
35	70,26	7634,3
40	66,71	5771,2
45	69,36	7010,2
50	68,27	6147,3
55	71,98	8757,4
60	69,48	7060,2
65	74,24	11135,2
70	68,39	6204,1
75	70,61	7701,2
80	72,75	9103,1

Tabulka 8.65: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při druhém zahřívání vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	65535	446,08	18452,2	559,59
30	65535	446,92	39425,45	558,37
35	65535	446,29	17696,5	554,9
40	65535	447,35	16285,45	561,43
45	65535	446,71	15630,1	558,37
50	65535	446,71	25302,65	556,33
55	65535	446,92	15245,08	559,59
60	65535	448,19	13715,25	557,96
65	65535	447,98	12689,21	565,3
70	65535	447,98	19353,3	558,37
75	65535	447,35	9465,71	561,23
80	65535	447,13	11233,11	558,37
<b>Průměr</b>	<b>65535</b>	<b>447,1342</b>	<b>17874,5</b>	<b>559,1508</b>

Tabulka 8.66: Maximální naměřené hodnoty ve spektru po prvním namáhání vzorku

V tabulce 8.66 lze vidět, že při zahřívání naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **65535** a daná  $\lambda$  na **447,1342 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 25 °C (**446,08 nm**) a nejvyšší na 65 a 70 °C (**447,98 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 60 °C s rozdílem **2,11 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 55 a 60 °C, kde na 60 °C byla  $\lambda$  větší o **1,27 nm**. To lze vidět v tabulce 8.68. V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **17874,5** a daná  $\lambda$  na **559,1508 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 35 °C (**554,9 nm**) a nejvyšší na 65 °C (**565,3 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 65 °C s rozdílem **5,71 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 65 a 70 °C, kde na 70 °C byla  $\lambda$  menší o **6,93 nm**.

V tabulce 8.67 lze vidět, že po druhém teplotním namáhání naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **65535** a daná  $\lambda$  na **447,61 nm**, to je o **0,475 nm** více než při prvním zahřívání. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 35 °C (**446,29 nm**) a nejvyšší na 50 °C (**448,83**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 35 °C s rozdílem **-2,11 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 35 a 40 °C, kde na 40 °C byla  $\lambda$  větší o **1,69 nm**. To lze vidět v tabulce 8.69. V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **19241,86** a daná  $\lambda$  na **555,925 nm**, to je o **0,44 nm** více než při prvním namáhání. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 40 a 60 °C (**554,9 nm**) a nejvyšší na 45 °C (**563,47 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 40 a 60 °C s rozdílem **-7,34 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 60 a 65 °C, kde na 65 °C byla  $\lambda$  větší o **6,73 nm**.

Integrační čas pro měření postupného zvyšování teploty bylo automaticky nastaveno na **14220  $\mu s$** . Spektrální charakteristiky těchto naměřených hodnot lze vidět na obrázcích 8.84 a 8.85.

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	65535	448,4	36367,83	562,24
30	65535	447,98	19015,39	559,59
35	65535	446,29	12998,46	557,76
40	65535	447,98	32261,65	554,9
45	65535	446,71	15206,17	563,47
50	65535	448,83	24596,1	561,23
55	65535	447,13	11982,67	560,82
60	65535	448,19	20362,95	554,9
65	65535	447,35	9539,44	561,63
70	65535	447,77	23699,09	557,96
75	65535	446,92	13719,34	558,37
80	65535	447,77	11153,24	562,24
<b>Průměr</b>	<b>65535</b>	<b>447,61</b>	<b>19241,86</b>	<b>559,5925</b>

Tabulka 8.67: Maximální naměřené hodnoty ve spektru po druhém namáhání vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	0,84	0,84	-1,22	-1,22
35	0,21	-0,63	-4,69	-3,47
40	1,27	1,06	1,84	6,53
45	0,63	-0,64	-1,22	-3,06
50	0,63	0	-3,26	-2,04
55	0,84	0,21	0	3,26
60	2,11	1,27	-1,63	-1,63
65	1,9	-0,21	5,71	7,34
70	1,9	0	-1,22	-6,93
75	1,27	-0,63	1,64	2,86
80	1,05	-0,22	-1,22	-2,86

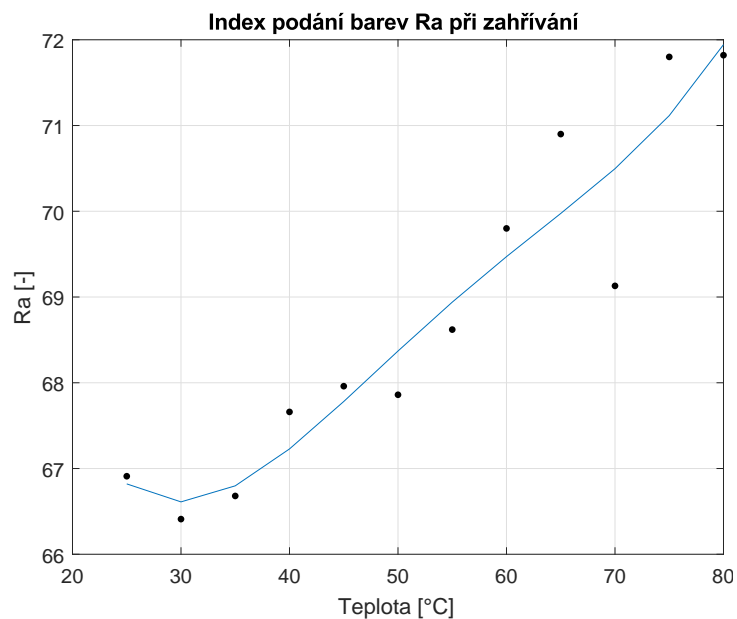
Tabulka 8.68: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po prvním namáhání vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	-0,42	-0,42	-2,65	-2,65
35	-2,11	-1,69	-4,48	-1,83
40	-0,42	1,69	-7,34	-2,86
45	-1,69	-1,27	1,23	8,57
50	0,43	2,12	-1,01	-2,24
55	-1,27	-1,7	-1,42	-0,41
60	-0,21	1,06	-7,34	-5,92
65	-1,05	-0,84	-0,61	6,73
70	-0,63	0,42	-4,28	-3,67
75	-1,48	-0,85	-3,87	0,41
80	-0,63	0,85	0	3,87

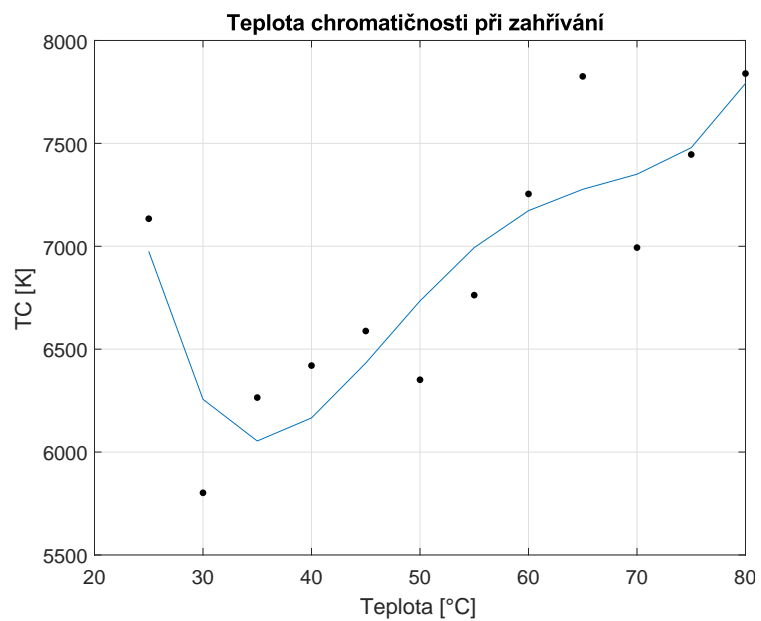
Tabulka 8.69: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po druhém namáhání vzorku

kde,  $\Delta_{25}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 25 °C

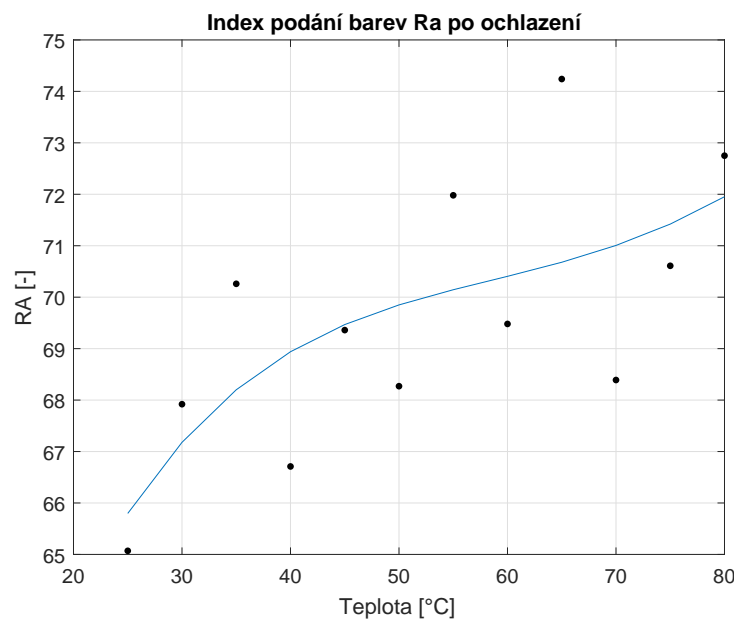
$\Delta_{předchozí}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě



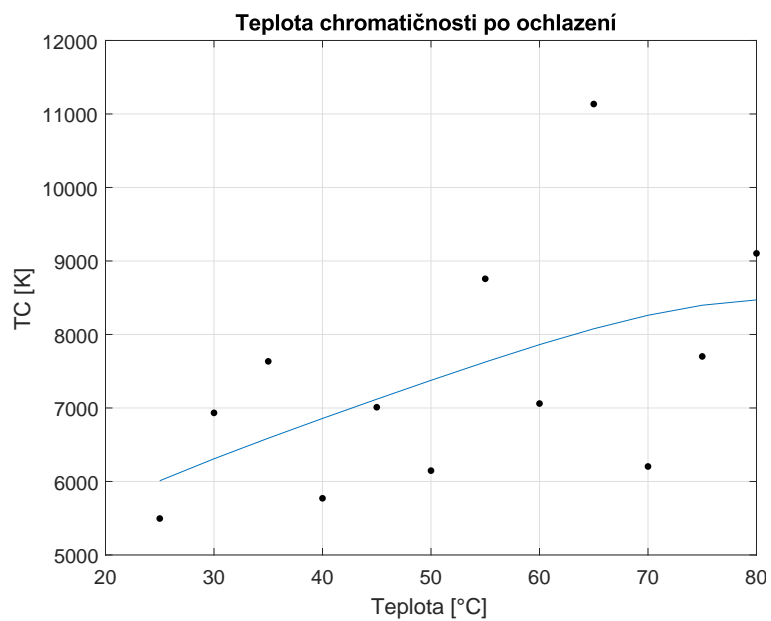
Obrázek 8.78: Index podání barev po prvním namáhání vzorku



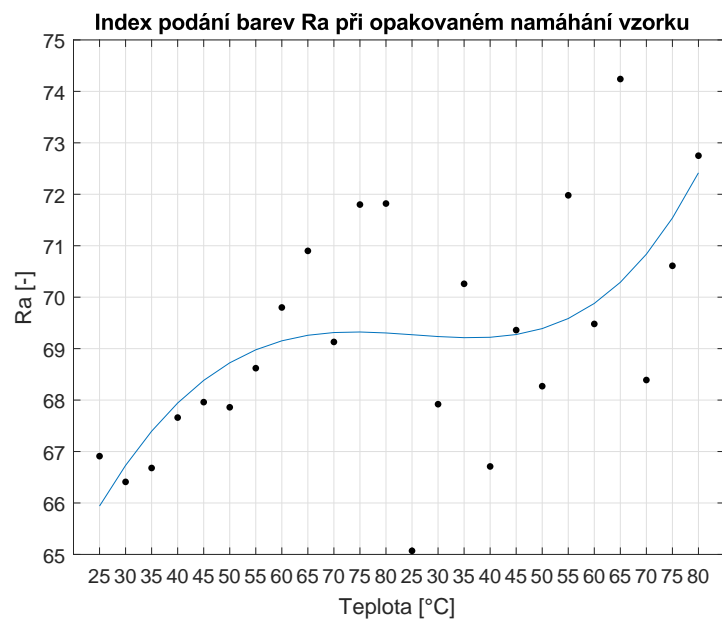
Obrázek 8.79: Teplota chromatičnosti po prvním namáhání vzorku



Obrázek 8.80: Index podání barev po druhém namáhání vzorku

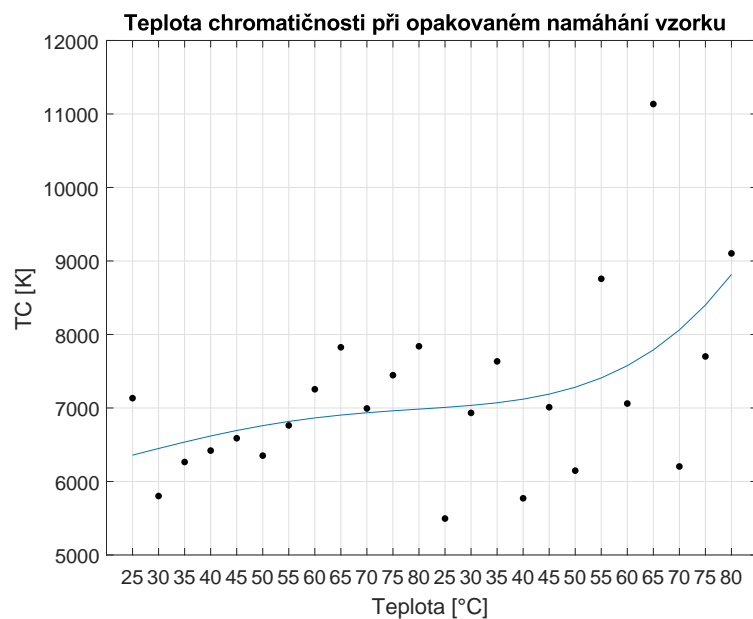


Obrázek 8.81: Teplota chromatičnosti po druhém namáhání vzorku

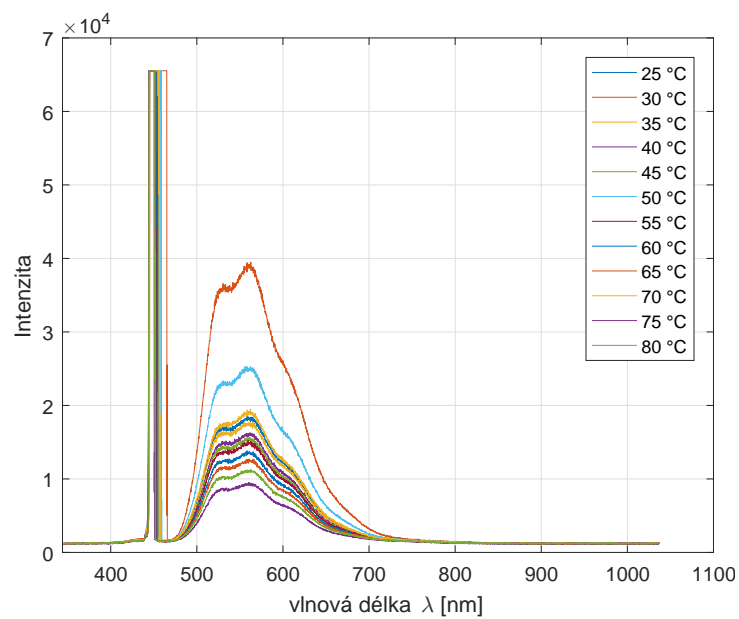


Obrázek 8.82: Index podání barev při opakovaném namáhání vzorku

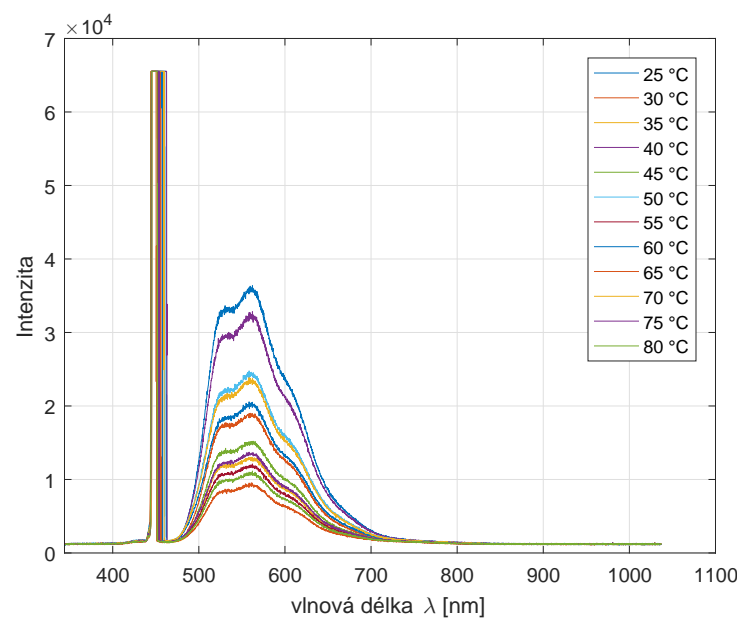




Obrázek 8.83: Teplota chromatičnosti při opakovaném namáhání vzorku



Obrázek 8.84: Spektrální charakteristika prvního namáhání vzorku



Obrázek 8.85: Spektrální charakteristika druhého namáhání vzorku

### 8.3.5 Shrnutí naměřených hodnot

V tabulce 8.70 jsou shrnuty průměrné naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti vzorků s koncentrací luminoforu 1:100. Jde vidět, že v prvním typu měření (postupné zvyšování teploty) je index podání barev maximální naměřenou hodnotou (**74,44**). Průměrný index podání barev před ochlazením je **66,55**. Teplota chromatičnosti před ochlazením vzorku má průměrnou hodnotu **9430,853 K**, kde naměřené maximum je při pozvolném ochlazování (**12035,53**) a naměřené minimum je při opakovaném namáhání (**6890,181 K**). Index podání barev po ochlazení je průměrně vyšší o **0,52**, kde maximální naměřený index podání barev je při měření prudkého ochlazení (**76,87**) a nejmenší u opakovaného namáhání (**69,586**). Průměrná teplota chromatičnosti po ochlazení je **10910,66 K** a nejvyšší průměrná teplota chromatičnosti je při měření prudkého ochlazení (**14335,44 K**) a nejnižší u opakovaného namáhání (**7412,79 K**), to je rozdíl o **6942,64 K** mezi maximem a minimem. Co se týče porovnání výsledků před ochlazením a po ochlazení, tak u indexu podání barev je nejvyšší rozdíl při měření prudkého ochlazení, kde po ochlazení je index podání barev vyšší o **2,8**. Ve všech typech měření jsou si indexy velmi podobné. Při měření pozvolného ochlazování je teplota chromatičnosti po ochlazení menší o **1072,79 K** a u měření prudkého ochlazení je teplota chromatičnosti před ochlazením vyšší o **4440,2 K**. U měření opakovaného namáhání je teplota chromatičnosti po ochlazení o **522,61 K** vyšší.

Typ měření	Před ochlazením		Po ochlazení	
	Ra [-]	Tc [K]	Ra [-]	Tc [K]
Postupné zvyšování teploty	74,44	8881,47	-	-
Pozvolné ochlazování	72,551	12036,53	72,518	10963,74
Prudké ochlazení	74,07	9915,231	76,87	14355,44
Opakované namáhání	68,79	690,181	69,586	7412,792

Tabulka 8.70: Průměrné naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti pro koncentraci vzorku 1:100

V tabulce 8.71 jsou shrnuty průměrné naměřené hodnoty intenzity a maximální vlnové délky vzorků s koncentrací luminoforu 1:100 v modrém světle. Naměřené maximální vlnové délky jsou si velmi podobné, kde před ochlazením nejvyšší rozdíl je o **1,78 nm**. Průměrná  $\lambda$  před ochlazením je **446,7465 nm**. Po ochlazení jsou si hodnoty také velmi podobné. Průměrná  $\lambda$  po ochlazení je **447,24 nm**, to je o **0,502 nm** více než před ochlazením. Nejvyšší rozdíl po ochlazení je při měření opakovaného namáhání (o **0,47 nm** více po ochlazení).

Typ měření	Modré světlo			
	Před ochlazením		Po ochlazení	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
Postupné zvyšování teploty	59461,01	445,4942	-	-
Pozvolné ochlazování	65535	447,2758	65535	447,231
Prudké ochlazení	65535	447,0817	65535	446,905
Opakované namáhání	65535	447,1342	65535	447,61

Tabulka 8.71: Průměrné naměřené hodnoty modrého světla intenzity a  $\lambda$  pro koncentraci vzorku 1:100

V tabulce 8.72 jsou shrnuty průměrné naměřené hodnoty intenzity a maximální vlnové délky vzorků s koncentrací luminoforu 1:100 v širokopásmovém světle. Maximální  $\lambda$  před ochlazením je průměrně **559,8 nm**, kde nejvyšší rozdíl je mezi měřením postupného zvyšování teploty (**561,34 nm**) a opakovaného namáhání (**559,15 nm**) o **2,19 nm**. Po ochlazení jsou naměřené hodnoty opět velmi podobné. Průměrná maximální  $\lambda$  je **559,78 nm**, to je o **0,02 nm** méně než před ochlazením. Nejvyšším rozdílem v porovnání mezi sebou je při měření prudkého ochlazení, kde po ochlazení je  $\lambda$  vyšší o **1,1 nm**.

Typ měření	Širokopásmové světlo			
	Před ochlazením		Po ochlazení	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
Postupné zvyšování teploty	5179,177	561,3425	-	-
Pozvolné ochlazování	16022,63	559,2525	23976,69	559,1855
Prudké ochlazení	26206,49	559,4558	23682,03	560,5625
Opakované namáhání	17874,5	559,1508	19241,86	559,5925

Tabulka 8.72: Průměrné naměřené hodnoty širokopásmového světla intenzity a  $\lambda$  pro koncentraci vzorku 1:100

## 8.4 Vzorek s koncentrací luminoforu 1:200

### 8.4.1 Postupné zvyšování teploty

Z naměřených výsledků v tabulce 8.73 je vidět, že index podání barev se pohyboval od **72,15** do **78,28**. Nejvyšší naměřené Ra je při 75 °C a nejmenší při 40 °C. Jak je vidět v grafu 8.86 průběh indexu podání barev je velmi stabilní a téměř konstantní. Průměrné Ra při postupném zvyšování teploty je **74,18**.

Teplota chromatičnosti je průměrně na **9507,276K**. Nejvyšší naměřená teplota chromatičnosti je na 65 °C (**21197,97K**) a nejmenší naměřená hodnota při 50 °C (**7921K**). Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.87 a stejně jako u indexu podání barev je stabilní a jediný větší nárůst bylo při maximální naměřené hodnotě při 65 °C.

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	73,28846	8208,577
30	72,74231	8070,923
35	72,13571	7978,643
40	72,15	8013,5
45	75,5	8389,5
50	72,7	7921
55	72,05517	7500,793
60	76,76757	12381,7
65	77,74444	21197,97
70	72,81053	7924,474
75	78,28889	8001
80	74	8499,222

Tabulka 8.73: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti

V tabulce 8.74 lze vidět, že naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **65535** a daná  $\lambda$  na **446,9925 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 30 °C (**446,08 nm**) a nejvyšší na 75 °C (**448,4**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 50 °C s rozdílem **-1,69 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 45 a 50 °C, kde na 50 °C byla  $\lambda$  menší o **2,54 nm**. To lze vidět v tabulce 8.75.

V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **32164,72** a daná  $\lambda$  na **563,04 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 25, 30, 35, 40, 50 a 70 °C (**562,24 nm**) a nejvyšší na 60 °C (**565,1 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 75 °C s rozdílem **3,67 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 70 a 75 °C, kde na 75 °C byla  $\lambda$  větší o **3,67 nm**. Integrační čas pro měření postupného zvyšování teploty bylo automaticky nastaveno na **14220  $\mu$ s**. Spektrální charakteristiku těchto naměřených hodnot lze vidět na obrázku 8.88.

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	65535	447,13	37787,07	562,24
30	65535	446,08	45825,35	562,24
35	65535	447,98	44301,66	562,24
40	65535	446,29	25925,24	562,24
45	65535	447,98	22779,56	562,65
50	65535	445,44	7997,32	562,24
55	65535	446,92	40295,83	562,86
60	65535	446,92	25976,44	565,1
65	65535	447,77	20141,77	563,67
70	65535	446,92	54195,4	562,24
75	65535	448,4	16363,27	565,91
80	65535	446,08	44387,67	562,86
<b>Průměr</b>	<b>65535</b>	<b>446,9925</b>	<b>32164,72</b>	<b>563,0408333</b>

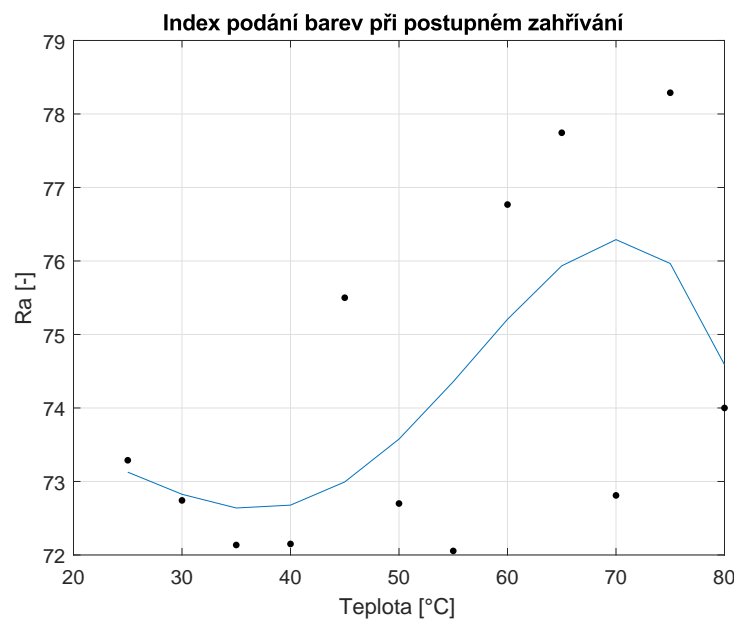
Tabulka 8.74: Maximální naměřené hodnoty ve spektru při postupném zvyšování teploty

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	-1,05	-1,05	0	0
35	0,85	1,9	0	0
40	-0,84	-1,69	0	0
45	0,85	1,69	0,41	0,41
50	-1,69	-2,54	0	-0,41
55	-0,21	1,48	0,62	0,62
60	-0,21	0	2,86	2,24
65	0,64	0,85	1,43	-1,43
70	-0,21	-0,85	0	-1,43
75	1,27	1,48	3,67	3,67
80	-1,05	-2,32	0,62	-3,05

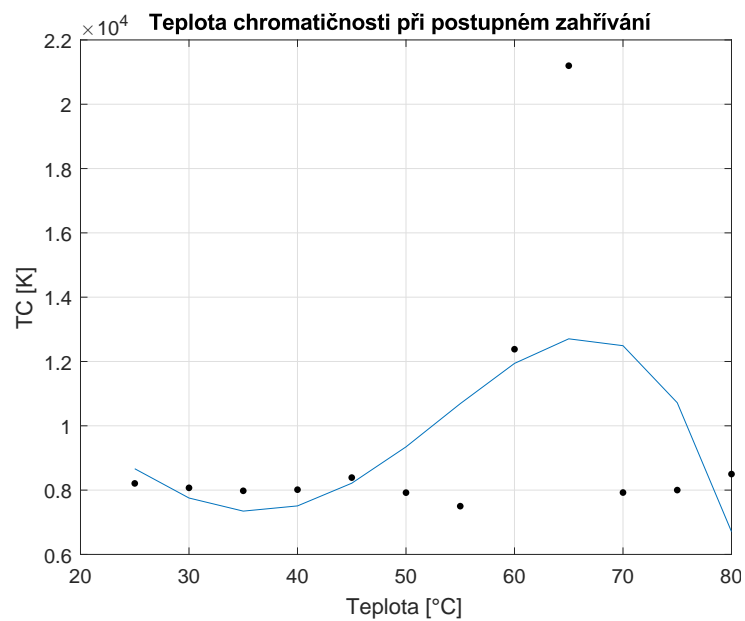
Tabulka 8.75: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek

kde,  $\Delta_{25}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 25 °C

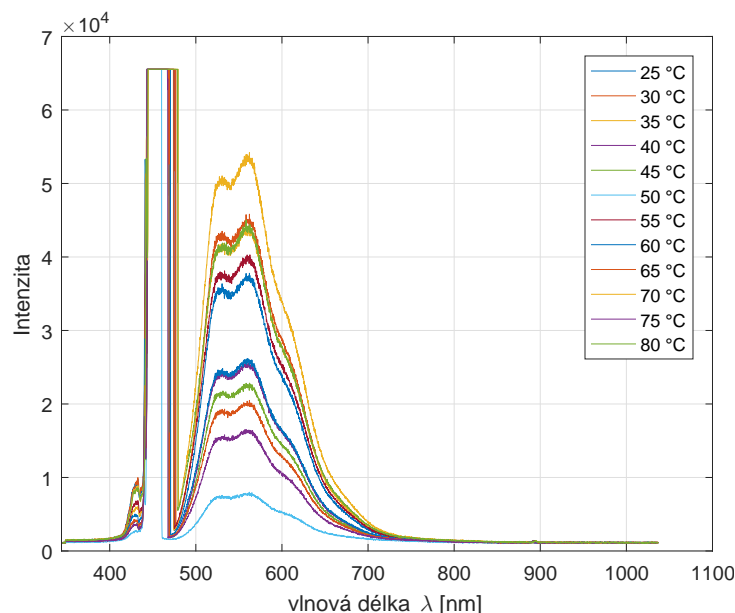
$\Delta_{předchozí}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě



Obrázek 8.86: Index podání barev při postupném zahřívání



Obrázek 8.87: Teplota chromatičnosti při postupném zahřívání



Obrázek 8.88: Spektrální charakteristika měření zvyšování teploty

#### 8.4.2 Pozvolné ochlazování

Z naměřených výsledků v tabulce 8.76 je vidět, že index podání barev při zahřívání vzorku se pohyboval mezi **68,43** a **73,85** Ra. Maximum bylo naměřeno při 40 °C a minimum při 30 °C. Z grafu na obrázku 8.62 lze vidět, že křivka Ra do 40 °C byla roustoucí a od 45 °C klesající. Průměrný naměřený index podání barev je **69,9175**. Teplota chromatičnosti se průměrně pohybovala na hodnotě **14304,6K**, kde na teplotě 40 °C bylo naměřené maximum **46203,3K**, tato Tc představovala také jako jediný velký nárůst Tc v tomto měření. Minimální teplota chromatičnosti byla naměřena na 25 °C (**8621,05K**). Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.90.

Při ochlazování vzorku průměrný index podání barev byl na hodnotě **69,166**, to je o **0,75** méně než při zahřívání vzorku. Maximum bylo naměřeno na 70 °C (**70,6**) a minimum na 30 °C (**68,11**). V tomto případě křivka grafu má střídavější průběh s celkovým klesajícím trendem. To znamená pro menší teploty menší index podání barev. Graf lze vidět na obrázku 8.91. Průměrná teplota chromatičnosti při ochlazování podle tabulky 8.77 je **10601K**. Nejvyšší naměřená teplota chromatičnosti je při 70 °C (**14731K**) a nejnižší při 30 °C (**8317,45K**), takže Tc se pohybuje v rozmezí **5731,29K**. Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě při ochlazování je graficky znázorněn na grafu 8.92.



Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	69,44545455	8621,045
30	68,43333333	11610,11
35	70,14	14683,2
40	73,85	46203,33
45	70,52105263	12492,32
50	69,72941176	11861,71
55	69,17142857	11842,43
60	69,11428571	11624,79
65	69,425	9540,375
70	69,8	11636,47
75	70,00555556	10981,72
80	69,375	10558,2

Tabulka 8.76: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při zahřívání vzorku

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
75	70,03182	10686,91
70	70,6	14731
65	69,9	11223,67
60	68,55333	9420,667
55	68,19	9285,9
50	68,62143	8851
45	69,74	14048,75
40	68,50625	9036,063
35	69,25	8757,5
30	68,11818	8317,455
25	69,31538	12252

Tabulka 8.77: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při ochlazování vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda$ [nm]	Intenzita [-]	$\lambda$ [nm]
25	65535	446,71	39476,65	563,87
30	65535	446,71	29070,92	563,87
35	65535	447,35	27633,24	563,87
40	65535	446,71	23355,04	565,1
45	65535	447,35	34147,83	565,1
50	65535	446,71	35132,9	563,87
55	65535	446,92	35855,84	560,82
60	65535	447,13	35331,56	563,87
65	65535	447,13	38751,66	554,9
70	65535	447,35	35116,52	563,87
75	65535	447,35	18591,46	563,87
80	65535	446,92	35804,64	558,98
<b>Průměr</b>	<b>65535</b>	<b>447,0283</b>	<b>32355,69</b>	<b>562,6658</b>

Tabulka 8.78: Maximální naměřené hodnoty ve spektru při zahřívání vzorku

V tabulce 8.78 lze vidět, že při zahřívání naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **65535** a daná  $\lambda$  na **447,0283 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 30 °C (**446,71 nm**) a nejvyšší na 70 °C (**447,35 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 35 °C s rozdílem **0,64 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 35 a 40 °C, kde na 75 °C byla  $\lambda$  menší o **0,64 nm**. To lze vidět v tabulce 8.80. V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **32355,69** a daná  $\lambda$  na **562,6658 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 65 °C (**554,9 nm**) a nejvyšší na 45 °C (**565,1 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 65 °C s rozdílem **-8,97 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 65 a 70 °C, kde na 70 °C byla  $\lambda$  větší o **8,97 nm**.

V tabulce 8.79 lze vidět, že při ochlazování naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **65535** a daná  $\lambda$  na **446,8636 nm**, to je o **0,16 nm** méně než při zahřívání. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 55 °C (**445,65 nm**) a nejvyšší na 60 °C (**447,98 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 75 °C bylo při 55 °C s rozdílem **-1,91 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 60 a 55 °C, kde na 55 °C byla  $\lambda$  menší o **2,33 nm**. To lze vidět v tabulce 8.81. V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **37225,56** a daná  $\lambda$  na **559,8682 nm**, to je o **2,79 nm** méně než u zahřívání. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 40 °C (**554,9 nm**) a nejvyšší na 65 °C (**568,35**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 75 °C bylo při 65 °C s rozdílem **11,82 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 65 a 60 °C, kde na 60 °C byla  $\lambda$  menší o **10,59 nm**.

Integrační čas pro měření postupného zvyšování teploty bylo automaticky nastaveno na **5360  $\mu$ s**. Spektrální charakteristiky těchto naměřených hodnot lze vidět na obrázcích 8.95 a 8.96.

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
75	65535	447,56	34887,15	556,53
70	65535	446,92	13293,37	563,47
65	65535	446,5	33510,91	568,35
60	65535	447,98	36896,2	557,76
55	65535	445,65	40005,02	563,87
50	65535	447,77	40381,85	563,87
45	65535	446,92	39753,12	554,9
40	65535	446,71	40498,58	554,9
35	65535	447,13	43650,41	556,53
30	65535	446,5	43429,23	556,53
25	65535	445,86	43175,28	561,84
<b>Průměr</b>	<b>65535</b>	<b>446,863636</b>	<b>37225,56</b>	<b>559,8682</b>

Tabulka 8.79: Maximální naměřené hodnoty ve spektru při ochlazování vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	0	0	0	0
35	0,64	0,64	0	0
40	0	-0,64	1,23	1,23
45	0,64	0,64	1,23	0
50	0	-0,64	0	-1,23
55	0,21	0,21	-3,05	-3,05
60	0,42	0,21	0	3,05
65	0,42	0	-8,97	-8,97
70	0,64	0,22	0	8,97
75	0,64	0	0	0
80	0,21	-0,43	-4,89	-4,89

Tabulka 8.80: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek při zahřívání

kde,  $\Delta_{25}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 25 °C

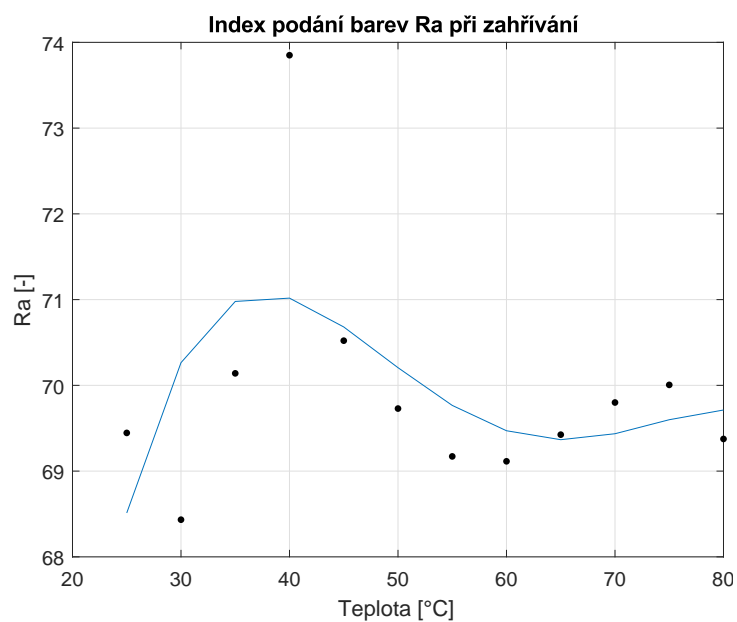
$\Delta_{předchozí}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{75}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{75}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
75	0	0	0	0
70	-0,64	-0,64	6,94	6,94
65	-1,06	-0,42	11,82	4,88
60	0,42	1,48	1,23	-10,59
55	-1,91	-2,33	7,34	6,11
50	0,21	2,12	7,34	0
45	-0,64	-0,85	-1,63	-8,97
40	-0,85	-0,21	-1,63	0
35	-0,43	0,42	0	1,63
30	-1,06	-0,63	0	0
25	-1,7	-0,64	5,31	5,31

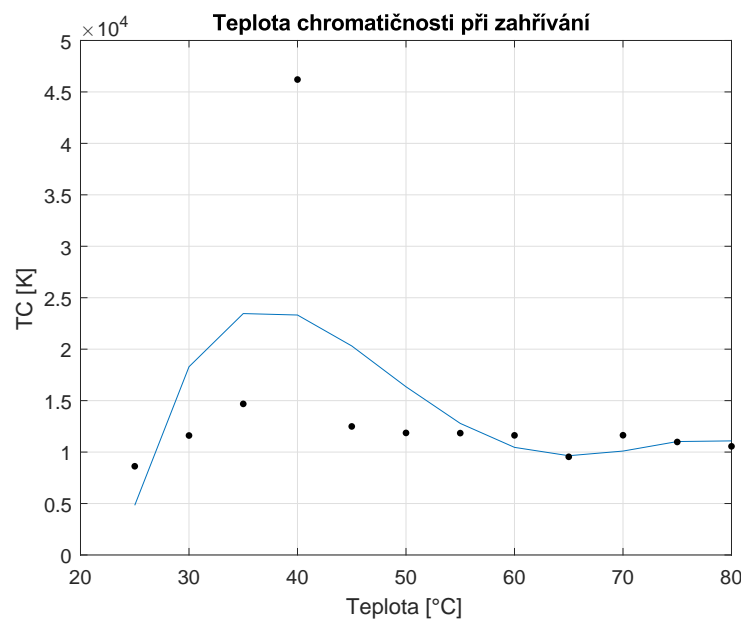
Tabulka 8.81: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek při ochlazování

kde,  $\Delta_{75}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 75 °C

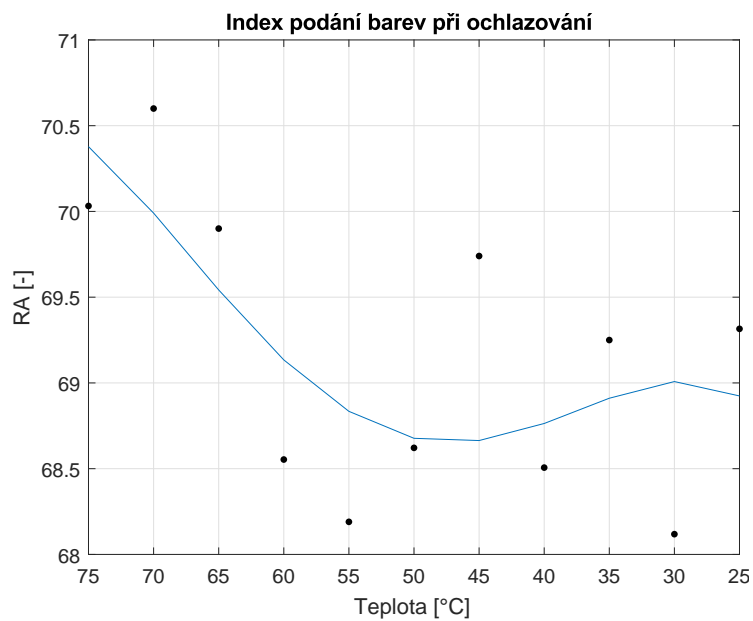
$\Delta_{předchozí}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě



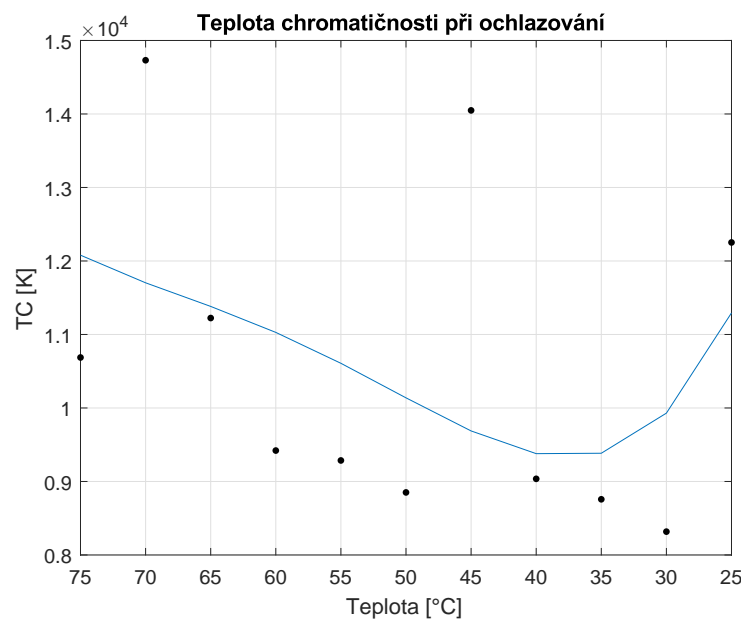
Obrázek 8.89: Index podání barev při zahřívání vzorku



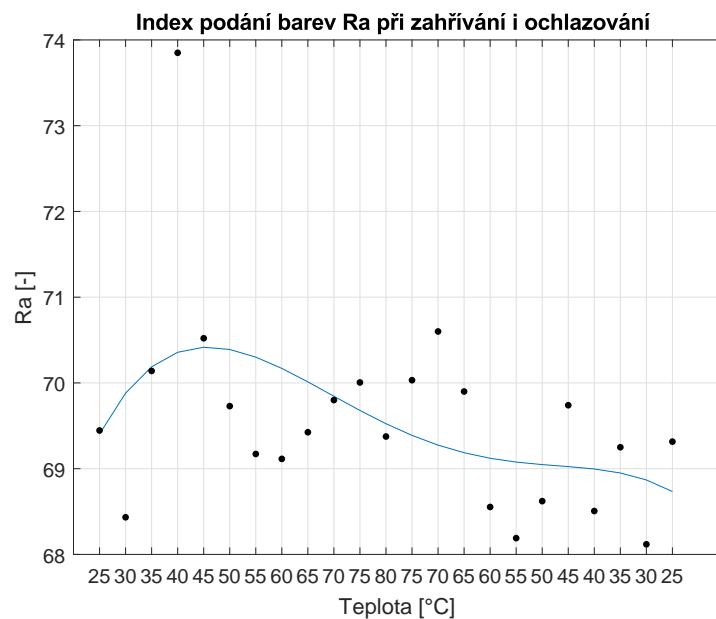
Obrázek 8.90: Teplota chromatičnosti při zahřívání vzorku



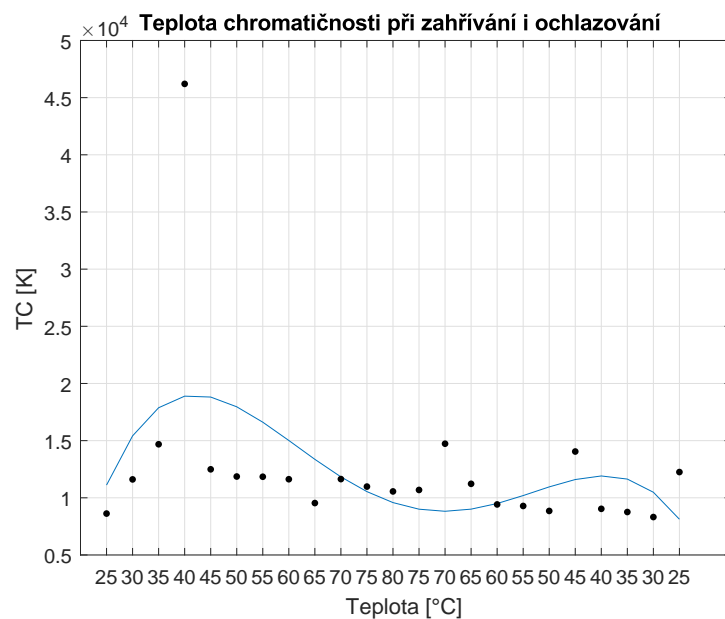
Obrázek 8.91: Index podání barev při ochlazování vzorku



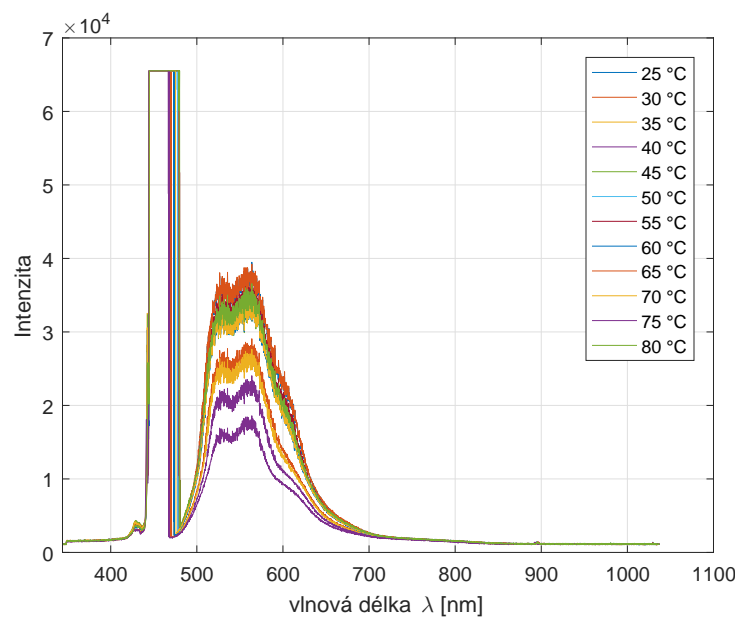
Obrázek 8.92: Teplota chromatičnosti při ochlazování vzorku



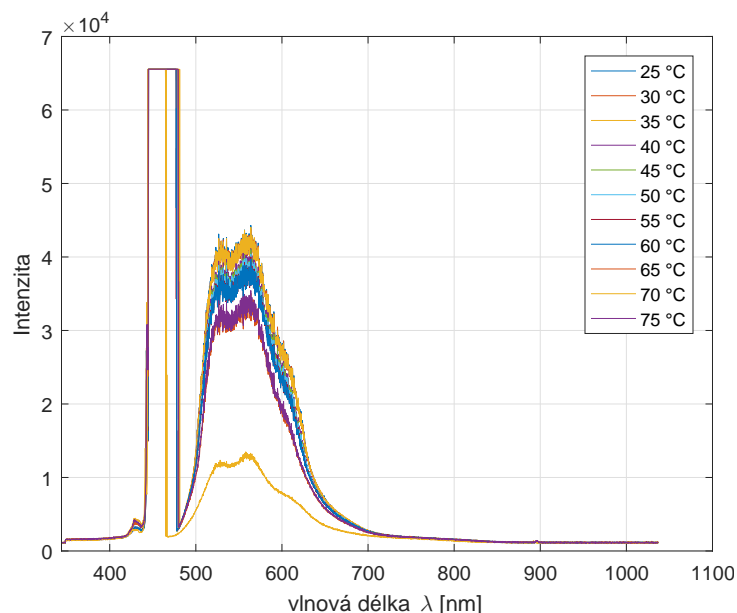
Obrázek 8.93: Index podání barev při zahřívání i ochlazování vzorku



Obrázek 8.94: Teplota chromatičnosti při zahřívání i ochlazování vzorku



Obrázek 8.95: Spektrální charakteristika zahřívání vzorku



Obrázek 8.96: Spektrální charakteristika ochlazování vzorku

### 8.4.3 Prudké ochlazení

Z naměřených výsledků v tabulce 8.82 je vidět, že index podání barev při zahřívání vzorku se průměrně pohyboval na hodnotě **70,39**. Největší naměřená hodnota indexu podání barev je na teplotě 35 °C (**73,2**) a nejmenší na 60 °C (**69,1**). Z naměřeného maxima a minima vidíme, že hodnoty se pohybují maximálním rozdílem **4,04 Ra**. Průběh indexu podání barev závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.97. Teplota chromatičnosti je průměrně na **14672,98K**. Průběh teploty chromatičnosti v závislosti na teplotě je téměř konstantní vyjma 35 °C (**28481K**), kde  $T_c$  vzrostlo o **16493K**. Nejmenší naměřená hodnota teploty chromatičnosti byla při 40 °C (**10550,25K**). Od 35 °C byl střídavý průběh grafu s klesajícím trendem, který jde vidět na grafu 8.98.

Po prudkém ochlazení se index podání barev se moc neodlišoval hodnotami od měření před ochlazením, kde průměrné  $R_a$  bylo **71,555**, to je o **1,15  $R_a$**  více než při zahřívání. Nejmenší  $R_a$  bylo naměřeno na 25 °C (**69,67**) a nejvyšší na 35 °C (**73,825**). Tyto naměřená data lze vidět v grafu 8.99. Průměrná teplota chromatičnosti po prudkém ochlazení podle tabulky 8.83 je **16056,13K** (o **1383,15K** více než u zahřívání). Nejvyšší naměřená teplota chromatičnosti je při 50 °C (**32245,5K**) a nejnižší při 65 °C (**11035,84K**), takže  $T_c$  se pohybuje v rozmezí **20745,364K**. Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě při ochlazování je graficky znázorněn na grafu 8.100.



Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	69,5842105	13391,5789
30	69,525	11988
35	73,2	28481
40	69,225	10550,25
45	71,7	20287
50	68,95	11068,25
55	71,8	19859
60	69,1588235	11955,5294
65	70,54	13775,125
70	69,525	10956,2143
75	69,8368421	11319,2941
80	71,7176471	12444,5

Tabulka 8.82: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při zahřívání

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	69,6766667	12110,8667
30	69,8045455	11500,1364
35	73,825	21737
40	72,0722222	14361,2727
45	71,4705882	13861,3077
50	72,425	32245,5
55	71,6222222	13357,1538
60	72,14375	15302
65	70,4263158	11035,8462
70	71,72	16334,7778
75	72,025	15911,3333
80	71,4583333	14916,3636

Tabulka 8.83: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti po ochlazení

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	65535	447,98	35141,1	563,87
30	65535	446,08	34930,16	563,87
35	65535	447,56	13518,64	562,65
40	65535	447,35	37742,02	556,53
45	65535	446,29	14763,81	558,37
50	65535	447,77	35614,18	556,53
55	65535	447,35	14165,8	558,37
60	65535	446,5	35585,5	556,53
65	65535	448,19	26646,12	559,8
70	65535	447,35	37645,76	563,87
75	65535	448,19	36845,01	556,53
80	65535	446,92	34348,53	556,53
<b>Průměr</b>	<b>65535</b>	<b>447,2942</b>	<b>29745,55</b>	<b>559,4542</b>

Tabulka 8.84: Maximální naměřené hodnoty ve spektru při zahřívání vzorku

V tabulce 8.84 lze vidět, že při zahřívání naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **65535** a daná  $\lambda$  na **447,2942 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 30 °C (**446,08 nm**) a nejvyšší na 65 °C (**448,19 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 30 °C s rozdílem **-1,9 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 25 a 30 °C, kde na 3 °C byla  $\lambda$  menší o **1,9 nm**. To lze vidět v tabulce 8.86. V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **29745,55** a daná  $\lambda$  na **559,4542 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 40 °C (**556,53 nm**) a nejvyšší na 25 °C (**563,87 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 40 °C s rozdílem **-7,34 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 70 a 75 °C, kde na 75 °C byla  $\lambda$  menší o **7,34 nm**.

V tabulce 8.85 lze vidět, že po prudkém ochlazení naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **65535** a daná  $\lambda$  na **447,1525 nm**, to je o **0,141 nm** méně než při zahřívání. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 25 °C (**445,44 nm**) a nejvyšší na 70 °C (**448,4 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 70 °C s rozdílem **2,96 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 25 a 30 °C, kde na 30 °C byla  $\lambda$  větší o **1,69 nm**. To lze vidět v tabulce 8.87. V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **30728,92** a daná  $\lambda$  na **561,425 nm**, to je o **1,97 nm** více než před ochlazením. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 80 °C (**556,53 nm**) a nejvyšší na 25 °C (**563,87**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 80 °C s rozdílem **-7,34 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 40 a 45 °C, kde na 45 °C byla  $\lambda$  větší o **5,5 nm**.

Integrační čas pro měření postupného zvyšování teploty bylo automaticky nastaveno na **5360  $\mu s$** . Spektrální charakteristiky těchto naměřených hodnot lze vidět na obrázcích 8.103 a 8.104.

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	65535	445,44	35462,63	563,87
30	65535	447,13	37375,43	563,87
35	65535	446,5	18478,82	558,37
40	65535	447,35	31995,42	558,37
45	65535	447,35	34774,51	563,87
50	65535	448,19	21757,62	558,37
55	65535	447,77	34803,18	563,87
60	65535	446,29	34027	563,87
65	65535	447,35	35892,7	563,87
70	65535	448,4	32564,75	563,87
75	65535	447,35	28292,69	558,37
80	65535	446,71	23322,27	556,53
<b>Průměr</b>	<b>65535</b>	<b>447,1525</b>	<b>30728,92</b>	<b>561,425</b>

Tabulka 8.85: Maximální naměřené hodnoty ve spektru po prudkém ochlazení vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	-1,9	-1,9	0	0
35	-0,42	1,48	-1,22	-1,22
40	-0,63	-0,21	-7,34	-6,12
45	-1,69	-1,06	-5,5	1,84
50	-0,21	1,48	-7,34	-1,84
55	-0,63	-0,42	-5,5	1,84
60	-1,48	-0,85	-7,34	-1,84
65	0,21	1,69	-4,07	3,27
70	-0,63	-0,84	0	4,07
75	0,21	0,84	-7,34	-7,34
80	-1,06	-1,27	-7,34	0

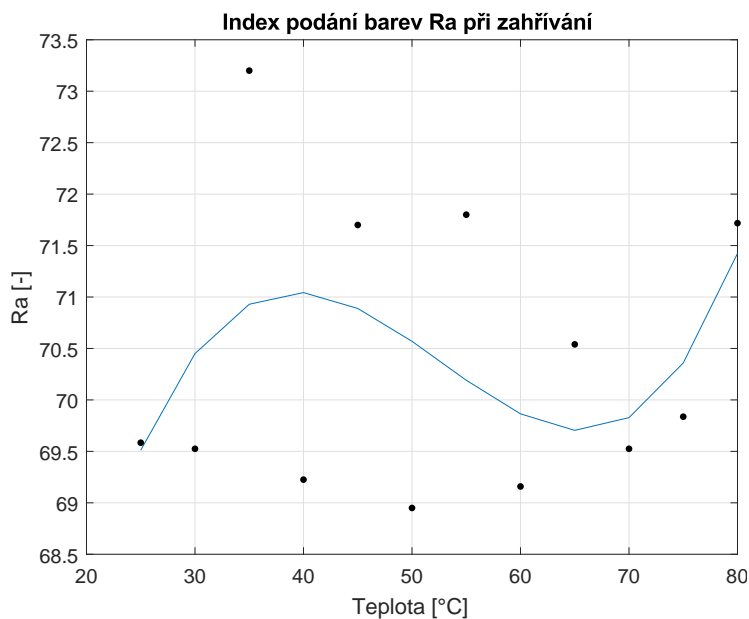
Tabulka 8.86: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek pro zahřívání vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	1,69	1,69	0	0
35	1,06	-0,63	-5,5	-5,5
40	1,91	0,85	-5,5	0
45	1,91	0	0	5,5
50	2,75	0,84	-5,5	-5,5
55	2,33	-0,42	0	5,5
60	0,85	-1,48	0	0
65	1,91	1,06	0	0
70	2,96	1,05	0	0
75	1,91	-1,05	-5,5	-5,5
80	1,27	-0,64	-7,34	-1,84

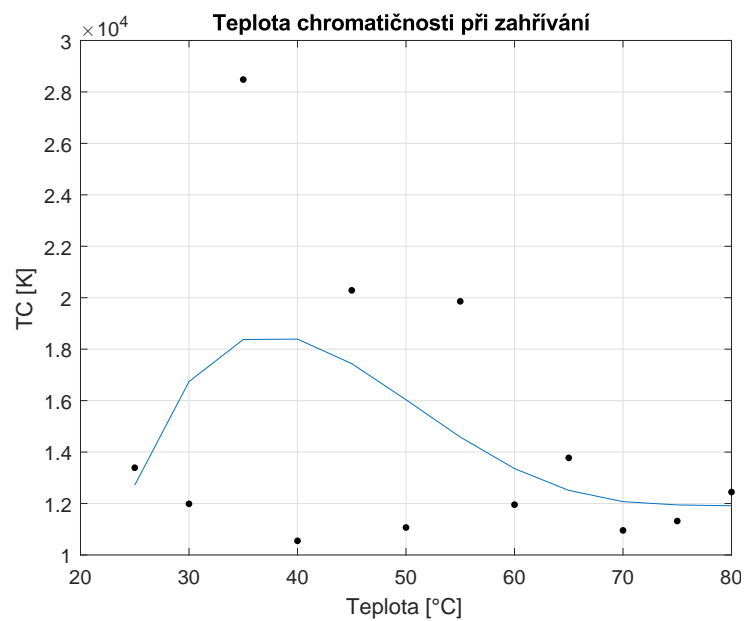
Tabulka 8.87: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po prudkém ochlazení vzorku

kde,  $\Delta_{25}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 25 °C

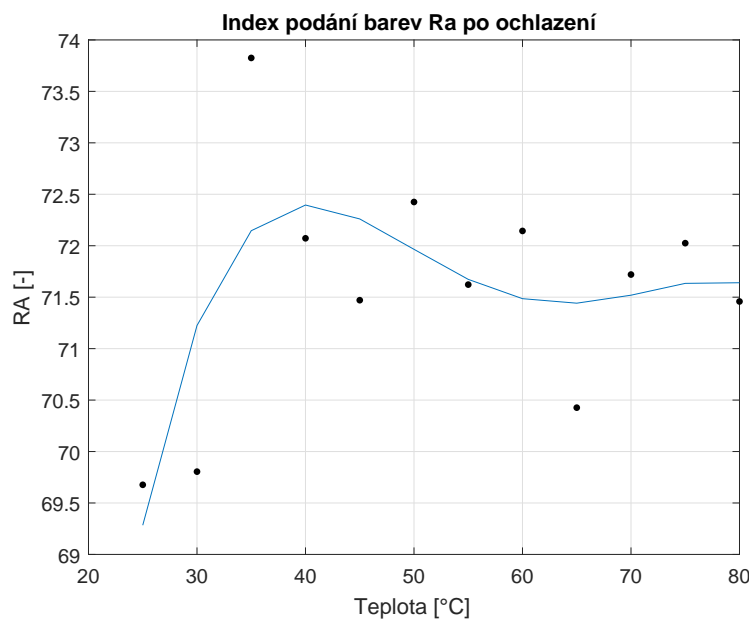
$\Delta_{předchozí}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě



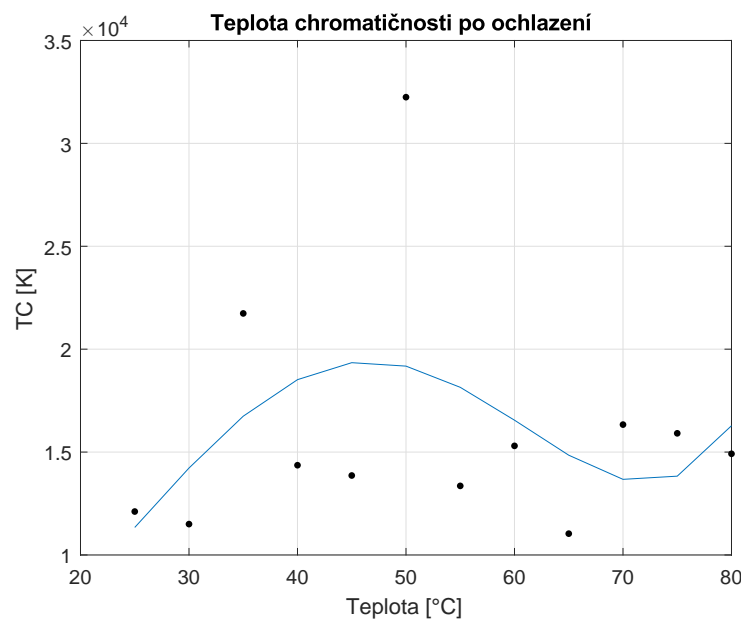
Obrázek 8.97: Index podání barev při zahřívání vzorku



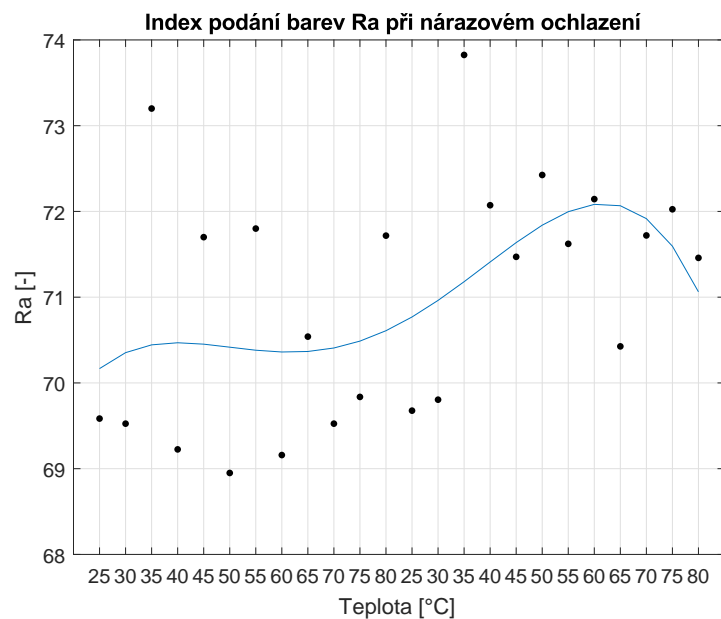
Obrázek 8.98: Teplota chromatičnosti při zahřívání vzorku



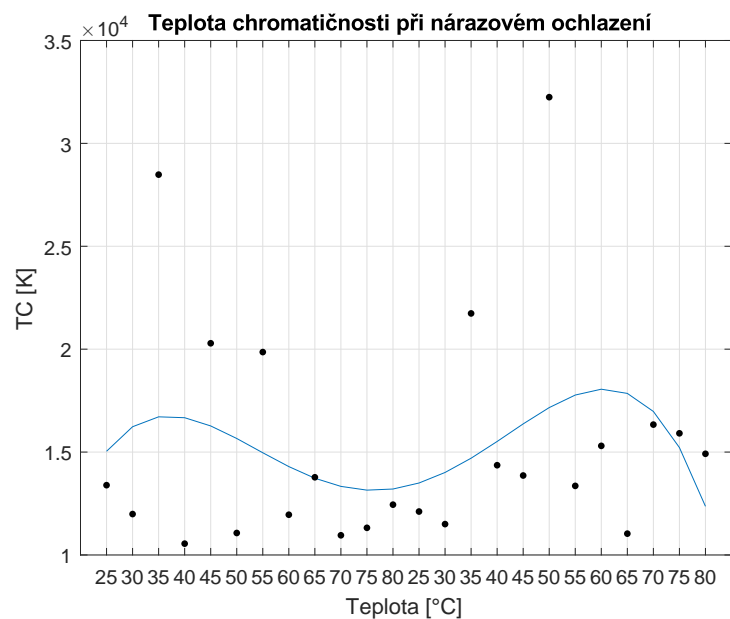
Obrázek 8.99: Index podání barev po prudkém ochlazení vzorku



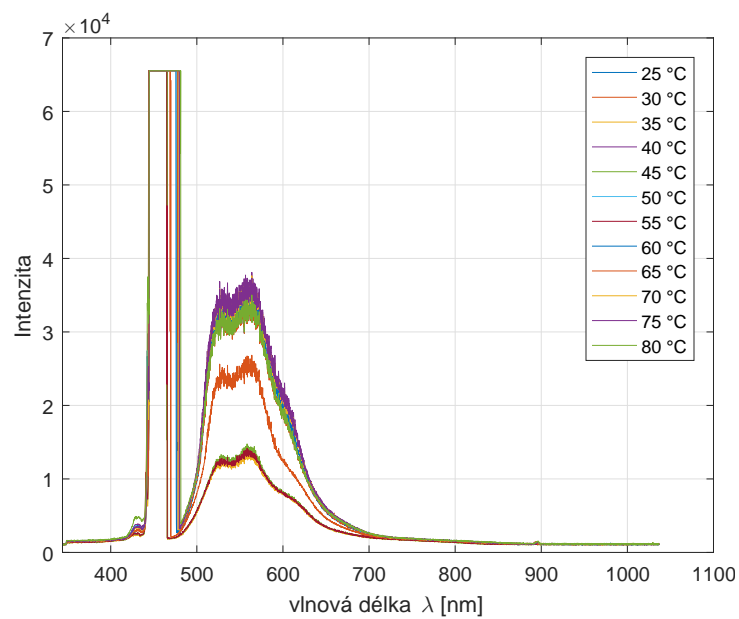
Obrázek 8.100: Teplota chromatičnosti po prudkém ochlazení vzorku



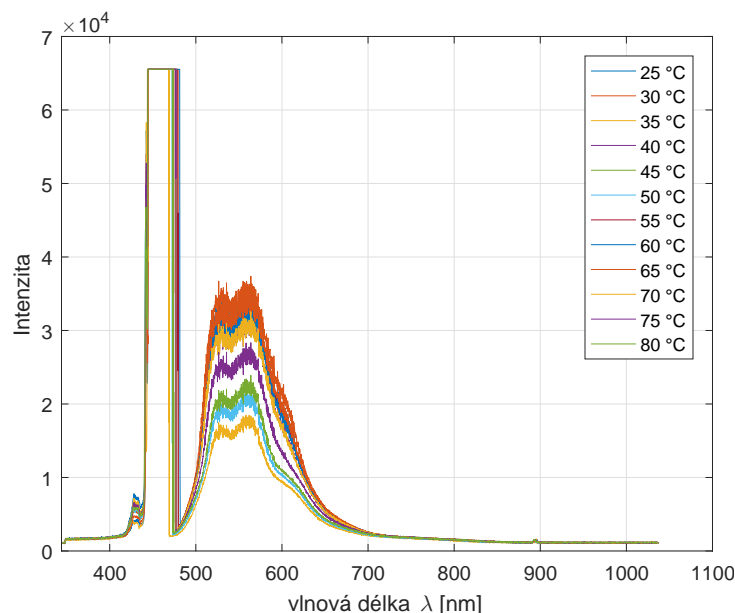
Obrázek 8.101: Index podání barev před a po prudkém ochlazení vzorku



Obrázek 8.102: Teplota chromatičnosti před a po prudkém ochlazení vzorku



Obrázek 8.103: Spektrální charakteristika zahřívání vzorku



Obrázek 8.104: Spektrální charakteristika po prudkém ochlazení vzorku

#### 8.4.4 Opakované namáhání vzorku po určité době

Z naměřených výsledků v tabulce 8.88 je vidět, že index podání barev při prvním zahřívání vzorku se průměrně pohyboval na hodnotě **70,61**. Index podání barev má konstantní průběh, kde maximální naměřená hodnota je **75,7** při 60 °C a nejmenší naměřená hodnota je **60,65** při 80 °C. Průběh indexu podání barev závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.105. Teplota chromatičnosti je průměrně na **12089,197K**. Průběh teploty chromatičnosti v závislosti na teplotě je rostoucí do 40 °C a od 45 °C klesající. Nejmenší naměřená hodnota (**5435,82K**) při 75 °C a maximální na 40 °C (**20998,818K**). Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě je graficky znázorněn na grafu 8.106.

Při druhém teplotním namáhání vzorku se index podání barev rapidně nezměnil v porovnání s prvním namáháním vzorku. Tedy průběh grafu je rostoucí. Průměrné  $R_a$  bylo **65,25**, to je o **5,364**  $R_a$  méně než při prvním zahřívání. Nejmenší  $R_a$  bylo naměřeno na 45 °C (**59,545**) a nejvyšší na 50 °C (**70,98**). Tyto naměřená data lze vidět v grafu 8.107. Průměrná teplota chromatičnosti při druhém teplotním namáhání podle tabulky 8.89 je **7984,217K** (o **4104,97K** méně než při prvním namáhání). Nejvyšší naměřená teplota chromatičnosti je při 75 °C (**12671,71K**) a nejnižší při 25 °C (**5498,44K**), takže teplota chromatičnosti se pohybuje v rozmezí **7173,2698K**. Průběh teploty chromatičnosti závislé na teplotě při ochlazování je graficky znázorněn na grafu 8.108.



Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	71,6777778	10724,7222
30	70,0444444	12363,2222
35	74,9	10535
40	74,0181818	20998,8182
45	75,4285714	20393,619
50	71,6714286	11478,6429
55	67,7227273	9661,86364
60	75,7	13486,3125
65	70,975	10705
70	74	11999,1429
75	60,6173913	5435,82609
80	60,6571429	7288,19048

Tabulka 8.88: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při prvním zahřívání vzorku

Teplota [°C]	Ra [-]	Tc [K]
25	60,38889	5498,444
30	61,80526	5987,947
35	60,50476	5696,381
40	63,95882	7950,529
45	59,545	5845,75
50	70,98947	10092,31
55	65,34762	7440,714
60	66,98571	8068,19
65	67,2	7721,353
70	68,77407	9340,083
75	68,21905	12671,71
80	69,32308	9497,192

Tabulka 8.89: Naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti při druhém zahřívání vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda$ [nm]	Intenzita [-]	$\lambda$ [nm]
25	65535	446,08	10792,8	558,37
30	65535	446,92	27872,85	563,87
35	65535	445,23	11306,84	558,37
40	65535	446,5	6993,81	559,59
45	65535	445,23	4476,86	561,02
50	65535	444,59	3575,75	562,24
55	65535	446,92	24575,62	563,87
60	65535	446,08	5390,25	558,37
65	65535	446,71	21317,31	558,37
70	65535	446,5	4126,66	555,92
75	65535	448,4	45860,16	563,87
80	65535	446,92	31049,25	556,53
<b>Průměr</b>	<b>65535</b>	<b>446,34</b>	<b>16444,85</b>	<b>560,0325</b>

Tabulka 8.90: Maximální naměřené hodnoty ve spektru po prvním namáhání vzorku

V tabulce 8.90 lze vidět, že při zahřívání naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **65535** a daná  $\lambda$  na **446,34 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 50 °C (**444,59 nm**) a nejvyšší na 75 °C (**448,4 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 75 °C s rozdílem **2,32 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 50 a 55 °C, kde na 55 °C byla  $\lambda$  větší o **2,33 nm**. To lze vidět v tabulce 8.92. V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **16444,85** a daná  $\lambda$  na **560,0325 nm**. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 70 °C (**555,92 nm**) a nejvyšší na 30 °C (**563,87 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 30 a 75 °C s rozdílem **5,5 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 70 a 75 °C, kde na 75 °C byla  $\lambda$  větší o **7,95 nm**.

V tabulce 8.91 lze vidět, že po druhém teplotním namáhání naměřená intenzita u modrého světla se průměrně pohybovala na **65535** a daná  $\lambda$  na **447,1525 nm**, to je o **0,81 nm** více než při prvním zahřívání. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 70 °C (**446,29 nm**) a nejvyšší na 50 °C (**448,83**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 505 °C s rozdílem **1,7 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 45 a 50 °C, kde na 50 °C byla  $\lambda$  větší o **2,12 nm**. To lze vidět v tabulce 8.93. V širokopásmovém světle se intenzita průměrně pohybovala na **41287,73** a daná  $\lambda$  na **561,7992 nm**, to je o **1,76 nm** více než při prvním namáhání. Nejmenší  $\lambda$  byla naměřena na 55 °C (**556,53 nm**) a nejvyšší na 35 °C (**563,87 nm**). Největším rozdílem vůči  $\lambda$  na 25 °C bylo při 55 a 65 °C s rozdílem **-7,34 nm**. Nejvyšším krokem mezi jednotlivými vlnovými délkami bylo mezi 55 a 60 °C, kde na 60 °C byla  $\lambda$  větší o **6,12 nm**.

Integrační čas pro měření postupného zvyšování teploty bylo automaticky nastaveno na **5360  $\mu$ s**. Spektrální charakteristiky těchto naměřených hodnot lze vidět na obrázcích 8.111 a 8.112.

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
25	65535	447,13	43179,37	563,87
30	65535	447,35	41076,11	563,87
35	65535	447,98	41698,69	563,87
40	65535	446,71	27102,82	563,87
45	65535	446,71	42757,49	563,87
50	65535	448,83	37647,81	561,84
55	65535	446,71	44213,6	556,53
60	65535	446,92	43717,99	562,65
65	65535	447,35	44045,66	556,53
70	65535	446,29	44758,36	558,98
75	65535	447,56	43609,45	563,87
80	65535	446,29	41645,44	561,84
<b>Průměr</b>	<b>65535</b>	<b>447,1525</b>	<b>41287,73</b>	<b>561,7992</b>

Tabulka 8.91: Maximální naměřené hodnoty ve spektru po druhém namáhání vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	0,84	0,84	5,5	5,5
35	-0,85	-1,69	0	-5,5
40	0,42	1,27	1,22	1,22
45	-0,85	-1,27	2,65	1,43
50	-1,49	-0,64	3,87	1,22
55	0,84	2,33	5,5	1,63
60	0	-0,84	0	-5,5
65	0,63	0,63	0	0
70	0,42	-0,21	-2,45	-2,45
75	2,32	1,9	5,5	7,95
80	0,84	-1,48	-1,84	-7,34

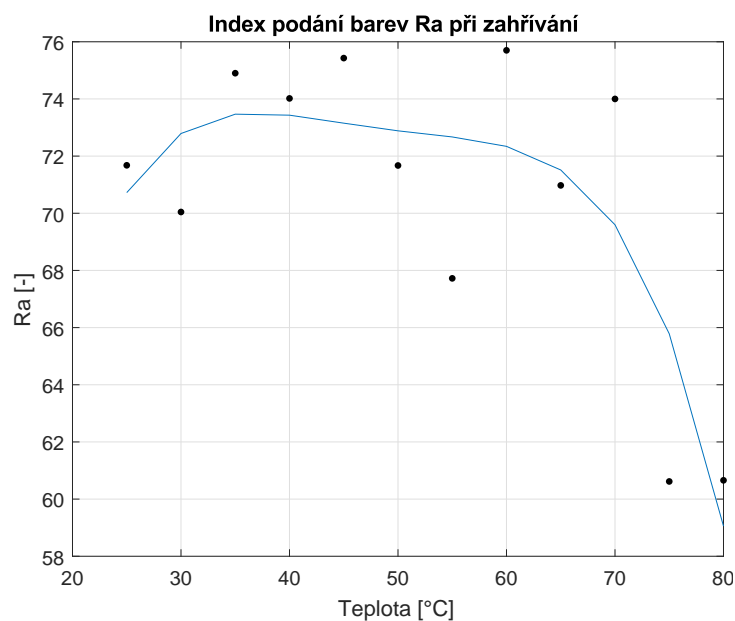
Tabulka 8.92: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po prvním namáhání vzorku

Teplota [°C]	Modré světlo		Širokopásmové světlo	
	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$	$\Delta_{25}[nm]$	$\Delta_{předchozí}[nm]$
25	0	0	0	0
30	0,22	0,22	0	0
35	0,85	0,63	0	0
40	-0,42	-1,27	0	0
45	-0,42	0	0	0
50	1,7	2,12	-2,03	-2,03
55	-0,42	-2,12	-7,34	-5,31
60	-0,21	0,21	-1,22	6,12
65	0,22	0,43	-7,34	-6,12
70	-0,84	-1,06	-4,89	2,45
75	0,43	1,27	0	4,89
80	-0,84	-1,27	-2,03	-2,03

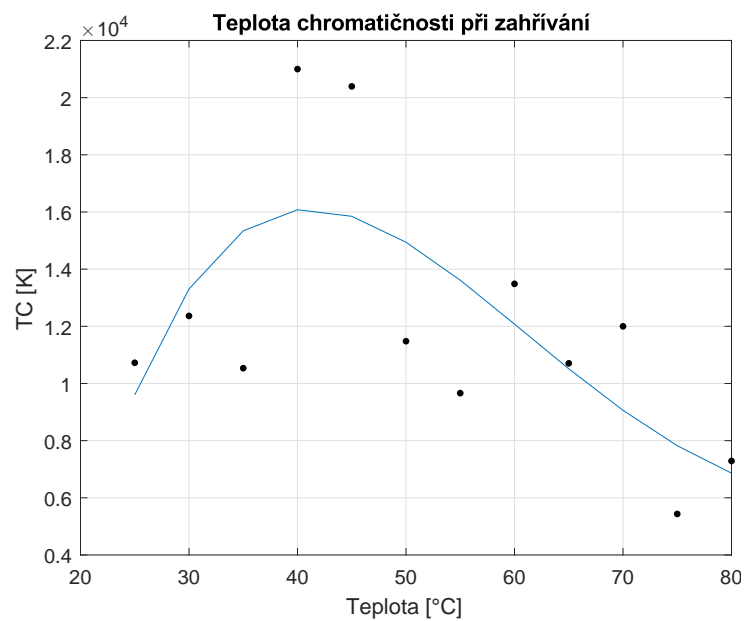
Tabulka 8.93: Vypočtené hodnoty rozdílů vlnových délek po druhém namáhání vzorku

kde,  $\Delta_{25}$  je rozdíl  $\lambda$  vůči naměřené  $\lambda$  při 25 °C

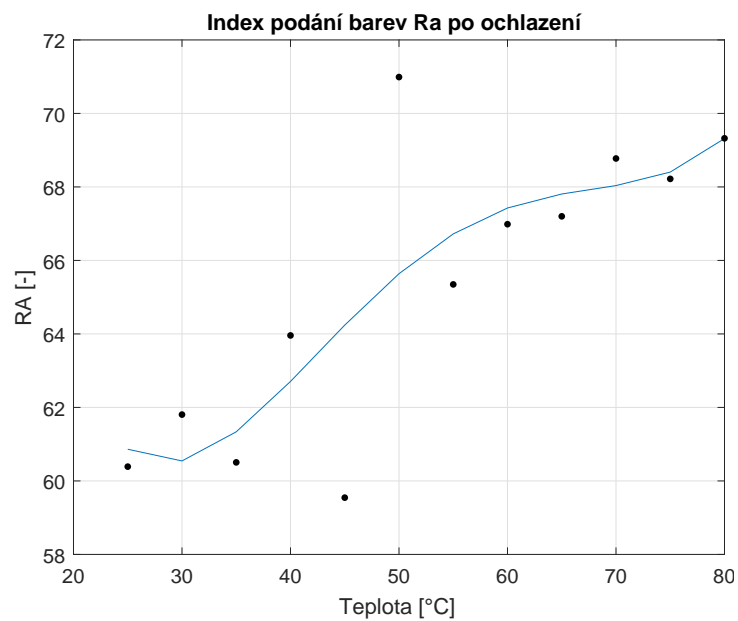
$\Delta_{předchozí}$  je rozdíl vlnové délky vůči předchozí teplotě



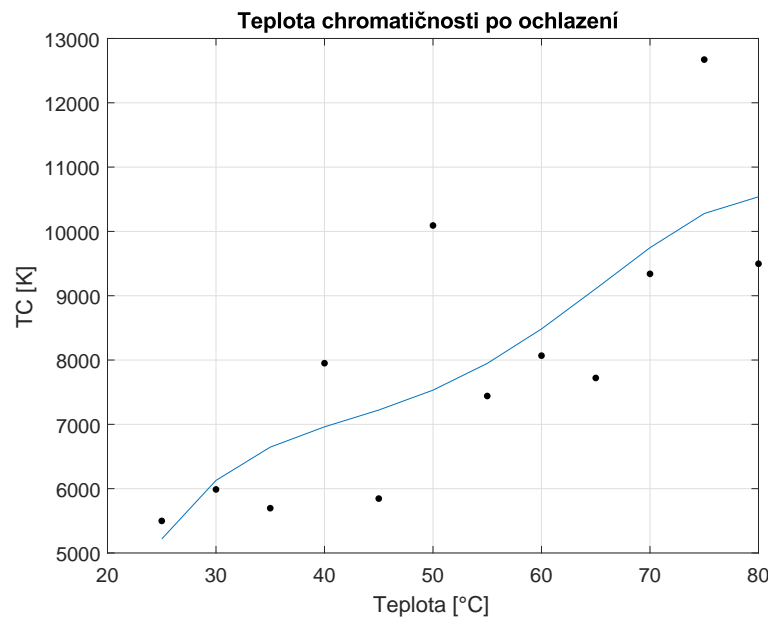
Obrázek 8.105: Index podání barev po prvním namáhání vzorku



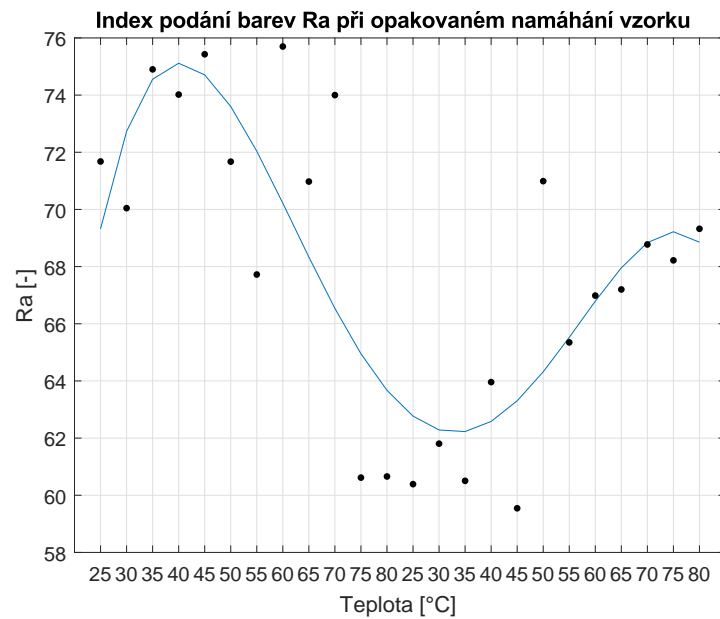
Obrázek 8.106: Teplota chromatičnosti po prvním namáhání vzorku



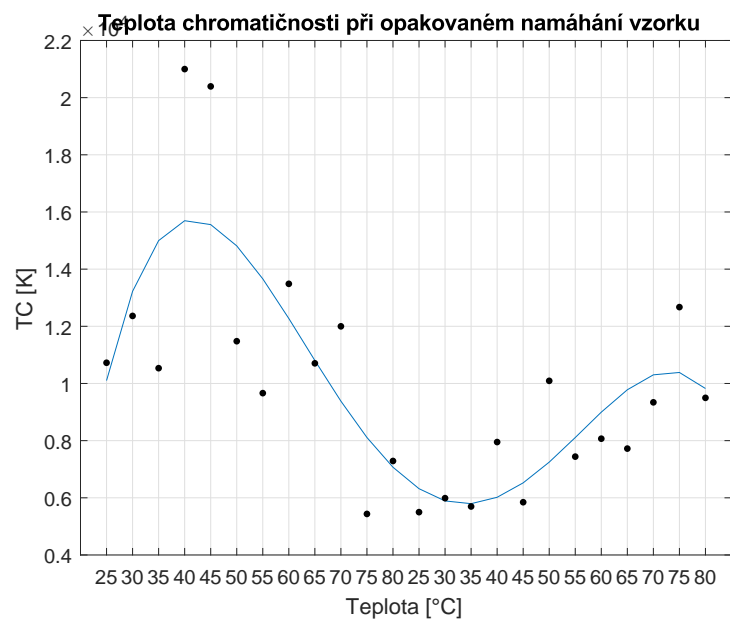
Obrázek 8.107: Index podání barev po druhém namáhání vzorku



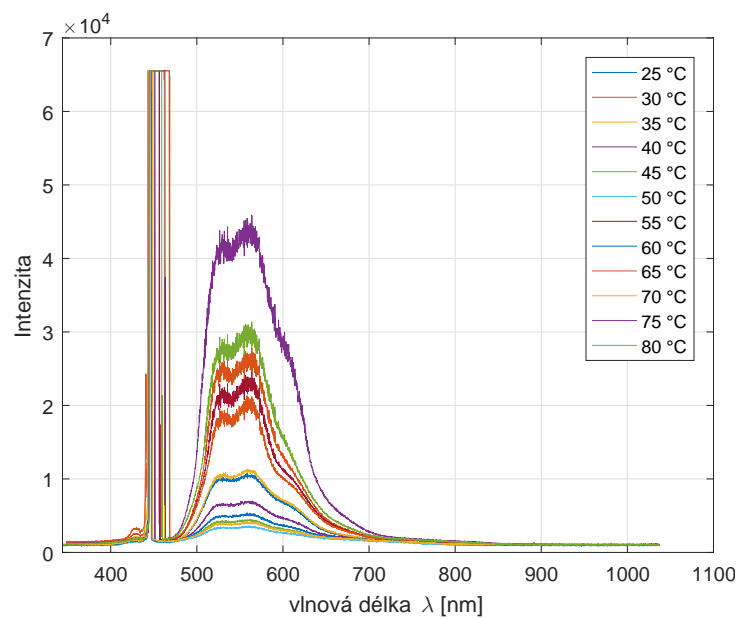
Obrázek 8.108: Teplota chromatičnosti po druhém namáhání vzorku



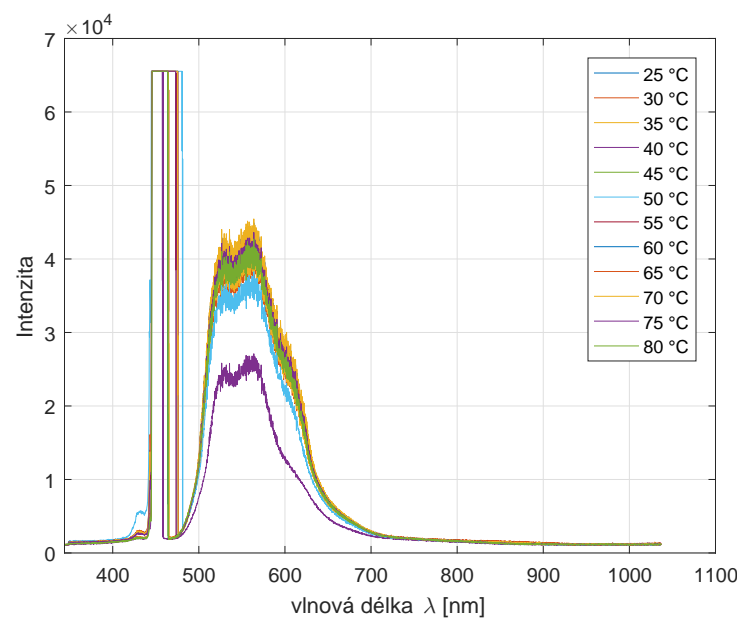
Obrázek 8.109: Index podání barev při opakovaném namáhání vzorku



Obrázek 8.110: Teplota chromatičnosti při opakovaném namáhání vzorku



Obrázek 8.111: Spektrální charakteristika prvního namáhání vzorku



Obrázek 8.112: Spektrální charakteristika druhého namáhání vzorku



### 8.4.5 Shrnutí naměřených hodnot

V tabulce 8.94 jsou shrnuty průměrné naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti vzorků s koncentrací luminoforu 1:200. Jde vidět, že v prvním typu měření (postupné zvyšování teploty) je index podání barev maximální naměřenou hodnotou (**74,18**). Průměrný index podání barev před ochlazením je **71,27**. Teplota chromatičnosti před ochlazením vzorku má průměrnou hodnotu **12643,51 K**, kde naměřené maximum je při prudkém ochlazení (**14672,98**) a naměřené minimum je při postupném zvyšování teploty (**9507,27 K**). Index podání barev po ochlazení je průměrně nižší o **2,61**, kde maximální naměřený index podání barev je při měření prudkého ochlazení (**71,55**) a nejmenší u opakovaného namáhání (**65,25**). Průměrná teplota chromatičnosti po ochlazení je **11547,12 K** a nejvyšší průměrná teplota chromatičnosti je při měření prudkého ochlazení (**16056,13 K**) a nejnižší u opakovaného namáhání (**7984,217 K**), to je rozdíl o **8071,91 K** mezi maximem a minimem. Co se týče porovnání výsledků před ochlazením a po ochlazení, tak u indexu podání barev je nejvyšší rozdíl při měření opakovaného namáhání, kde po ochlazení je index podání barev nižší o **5,36** v dalších typech měření jsou si indexy velmi podobné. Při měření pozvolného ochlazení je teplota chromatičnosti po ochlazení menší o **3703,6 K** a u měření prudkého ochlazení je teplota chromatičnosti po ochlazení vyšší o **1383,15 K**. U měření opakovaného namáhání je teplota chromatičnosti před ochlazením o **4104 K** vyšší.

Typ měření	Před ochlazením		Po ochlazení	
	Ra [-]	Tc [K]	Ra [-]	Tc [K]
Postupné zvyšování teploty	74,18	9507,276	-	-
Pozvolné ochlazení	69,9175	14304,6	69,166	10601
Prudké ochlazení	70,39	14672,98	71,555	16056,13
Opakované namáhání	70,61	12089,197	65,25	7984,217

Tabulka 8.94: Průměrné naměřené hodnoty indexu podání barev a teploty chromatičnosti pro koncentraci vzorku 1:200

V tabulce 8.95 jsou shrnuty průměrné naměřené hodnoty intenzity a maximální vlnové délky vzorků s koncentrací luminoforu 1:200 v modrém světle. Naměřené maximální vlnové délky jsou si velmi podobné, kde před ochlazením nejvyšší rozdíl je o **0,95 nm**. Průměrná  $\lambda$  před ochlazením je **446,9138 nm**. Po ochlazení jsou si hodnoty také velmi podobné. Průměrná  $\lambda$  po ochlazení je **447,056 nm**, to je o **0,14 nm** více než před ochlazením. Nejvyšší rozdíl vlnových délek v porovnání mezi sebou je při měření opakovaného namáhání (o **0,8125 nm** více po ochlazení).

Typ měření	Širokopásmové světlo			
	Před ochlazením		Po ochlazení	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
Postupné zvyšování teploty	65535	446,9925	-	-
Pozvolné ochlazování	65535	447,0283	65535	446,863
Prudké ochlazení	65535	447,2942	65535	447,1525
Opakované namáhání	65535	446,34	65535	447,1525

Tabulka 8.95: Průměrné naměřené hodnoty modrého světla intenzity a  $\lambda$  pro koncentraci vzorku 1:200

V tabulce 8.96 jsou shrnuty průměrné naměřené hodnoty intenzity a maximální vlnové délky vzorků s koncentrací luminoforu 1:200 v širokopásmovém světle. Maximální  $\lambda$  před ochlazením je průměrně **561,2981 nm**, kde nejvyšší rozdíl je mezi měřením postupného zvyšování teploty (**563,04 nm**) a prudkého ochlazování (**559,4542 nm**) o **3,5858 nm**. Po ochlazení jsou naměřené hodnoty opět velmi podobné. Průměrná maximální  $\lambda$  je **561,03 nm**, to je o **0,26 nm** méně než před ochlazením. Nejvyšším rozdílem v porovnání mezi sebou je při měření pozvolného ochlazování, kde před ochlazením je  $\lambda$  vyšší o **2,79 nm**.

Typ měření	Širokopásmové světlo			
	Před ochlazením		Po ochlazení	
	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$	Intenzita [-]	$\lambda[nm]$
Postupné zvyšování teploty	32164,72	563,04	-	-
Pozvolné ochlazování	32355,69	562,6658	37225,56	559,8682
Prudké ochlazení	29745,55	559,4542	30728,92	561,425
Opakované namáhání	16444,85	560,0325	41287,73	561,7992

Tabulka 8.96: Průměrné naměřené hodnoty širokopásmového světla intenzity a  $\lambda$  pro koncentraci vzorku 1:200

## Kapitola 9

# Porovnání výsledků mezi jednotlivými koncentracemi vzorků

### 9.1 Porovnání postupného zvyšování teploty vzorku

Teplota [°C]	1:2	1:50	1:100	1:200
	Zahřívání	Zahřívání	Zahřívání	Zahřívání
	$\lambda[nm]$	$\lambda[nm]$	$\lambda[nm]$	$\lambda[nm]$
25	558,19	561,84	562,24	562,24
30	568,55	561,84	558,37	562,24
35	578,7	561,02	557,96	562,24
40	570,38	560,21	564,28	562,24
45	581,13	561,02	558,37	562,65
50	553,27	560,21	562,24	562,24
55	567,13	559,69	562,24	562,86
60	573,83	561,84	563,47	565,1
65	576,67	561,43	559,59	563,67
70	567,33	560,61	562,86	562,24
75	554,43	562,24	563,26	565,91
80	569,16	559,59	561,23	562,86
<b>Průměr</b>	<b>568,2308</b>	<b>560,9616667</b>	<b>561,3425</b>	<b>563,0408333</b>

Tabulka 9.1: Porovnání naměřených výsledků vlnových délek pro širokopásmové světlo při měření postupného zvyšování teploty

Teplota [°C]	1:2	1:50	1:100	1:200
	Zahřívání	Zahřívání	Zahřívání	Zahřívání
	Ra [-]	Ra [-]	Ra [-]	Ra [-]
25	70,57	66,02	77,37	73,28846
30	71,4	75,52	74,58	72,74231
35	94,41	74,09	77,46	72,13571
40	95,86	83,26	79,25	72,15
45	95,44	86,35	71,17	75,5
50	93,16	74,25	67,69	72,7
55	94,43	90,17	69,32	72,05517
60	88,63	91,65	70,63	76,76757
65	94,04	65,89	70,15	77,74444
70	93,08	65,91	88,62	72,81053
75	93,67	66,44	72,24	78,28889
80	94,81	68,36	74,8	74
<b>Průměr</b>	<b>89,95833</b>	<b>75,65917</b>	<b>74,44</b>	<b>74,18192</b>

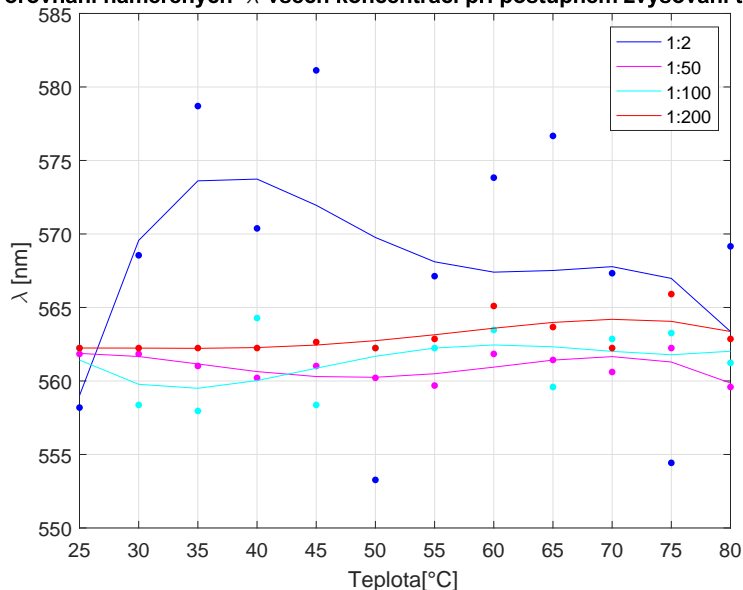
Tabulka 9.2: Porovnání naměřených indexů podání barev při měření postupného zvyšování teploty

Teplota [°C]	1:2	1:50	1:100	1:200
	Zahřívání	Zahřívání	Zahřívání	Zahřívání
	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]
25	36149	4478,3	8625,1	8208,577
30	37114,17	5030,4	9095,3	8070,923
35	5265,5	5352,3	18723,2	7978,643
40	5537,2	4891	14384,6	8013,5
45	5526	4864,1	6304	8389,5
50	5874,4	6300,9	5336,6	7921
55	4836,5	4765,9	5857,7	7500,793
60	6259,3	4784,6	6023,9	12381,7
65	4904,5	5341,6	5792,1	21197,97
70	5360,2	5383,4	7254,8	7924,474
75	5450,6	5464,8	5852,9	8001
80	5504,4	5728,5	13327,44	8499,222
<b>Průměr</b>	<b>10648,48</b>	<b>5198,817</b>	<b>8881,47</b>	<b>9507,276</b>

Tabulka 9.3: Porovnání naměřených teplot chromatičností při měření postupného zvyšování teploty

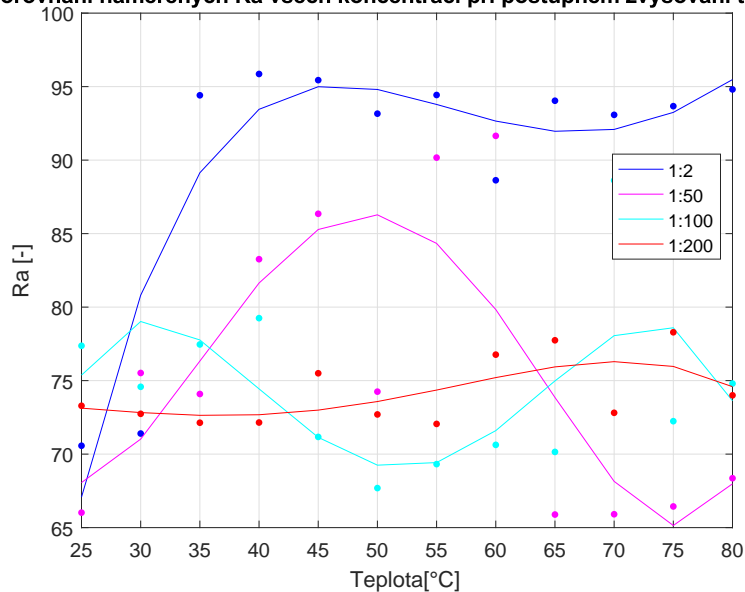
Z tabulky 9.1 a grafu 9.1 lze snadno zjistit, že trend křivky vlnové délky s koncentrací luminoforu 1:2 (modrá) je do 40 °C rostoucí a od 45 °C klesající. Trend vlnové délky pro luminofor s koncentrací 1:50 (růžová) je klesající do 50 °C a od 55 °C rostoucí. Trend křivky pro luminofor s koncentrací 1:100 (světle modrá) je kosinusového charakteru. Trend křivky 1:200 (červená) je lehce rostoucí po celou dobu měření. Tento fakt také vychází z toho, že průměrná  $\lambda$  pro 1:2 je **568,23 nm**, pro 1:50 **560,97 nm**, pro 1:100 **561,34 nm** a pro 1:200 **563,04 nm**.

Porovnání naměřených  $\lambda$  všech koncentrací při postupném zvyšování teploty



Obrázek 9.1: Porovnání naměřených  $\lambda$  všech koncentrací při zahřívání vzorků

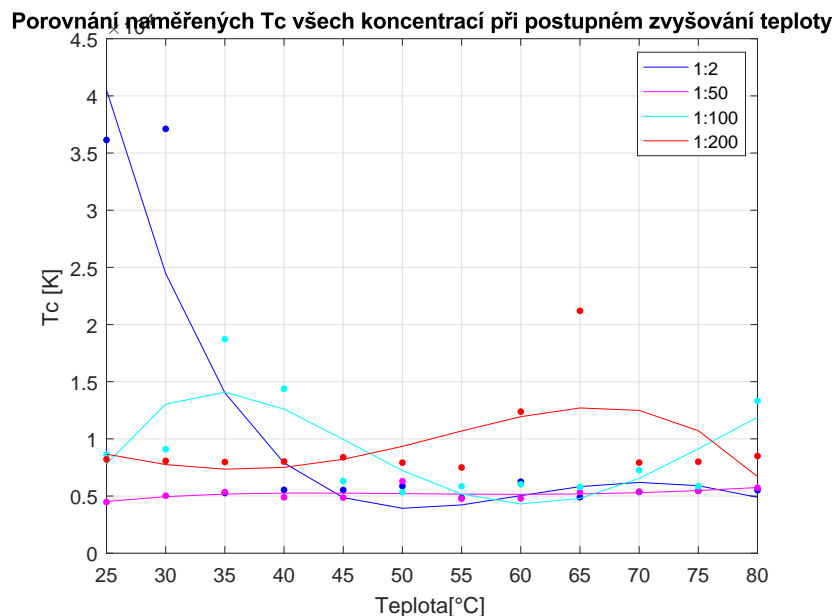
Porovnání naměřených Ra všech koncentrací při postupném zvyšování teploty



Obrázek 9.2: Porovnání naměřených indexů podání barev všech koncentrací při zahřívání vzorků

Z tabulky 9.2 a grafu 9.2 lze snadno zjistit, že trend křivky indexu podání barev s koncentrací luminoformu 1:2 (modrá) je do 45 °C rostoucí a od 50 °C klesající a od 70 °C rostoucí s poměrně vysokými hodnotami Ra v porovnání s ostatními luminoformy. Trend indexu podání barev pro luminoform s koncentrací 1:50 (růžová) je rostoucí do 50 °C a klesající od 55 °C. Trend křivky pro luminoform s koncentrací 1:100 (světle modrá) je sinusového charakteru. Křivka luminoformu 1:200 (červená) je

lehce rostoucí. Při porovnávání indexů podání barev je jasně vidět, že vzorek s 1:2 má mnohem větší hodnoty  $R_a$  v porovnání s ostatními vzorky. Ostatní vzorky mají podobné naměřené hodnoty to dokazuje také fakt, že průměrný index podání barev pro 1:2 je **89,96**, pro 1:50 **75,66**, pro 1:100 **74,44** a pro 1:200 **74,18**.



Obrázek 9.3: Porovnání naměřených teplot chromatičností všech koncentrací při zahřívání vzorků

Z tabulky 9.3 a grafu 9.3 lze snadno zjistit, že trend křivky teploty chromatičnosti s koncentrací luminoforu 1:2 (modrá) je do 45 °C silně klesající. Tento jev je s největší pravděpodobností způsoben tím, že teploty chromatičnosti pro 25 a 30 °C spektrometr špatně změřil, protože přesáhl citlivost spektrometru. Trend vlnové délky pro luminofor s koncentrací 1:50 (ružová) je konstantní po celou dobu měření. Trend křivky pro luminofor s koncentrací 1:100 (světle modrá) je sinusového charakteru. Křivka luminoforu 1:200 (červená) je jako jediná rostoucí s pravděpodobností špatně vyhodnocené teploty chromatičnosti v 65 °C jako u vzorku 1:2, protože hned v dalším kroku je trend křivky klesající. Při porovnávání teplot chromatičností je jasně vidět, že všechny vzorky mají velmi podobné hodnoty (pokud bychom nebrali v potaz špatně naměřené hodnoty) a to dokazuje také fakt, že průměrná teplota chromatičnosti pro 1:2 (bez 25 a 30 °C) je **5451,86 K**, pro 1:50 **5198,817 K**, pro 1:100 **8881,47 K** a pro 1:200 (bez 65 °C) **8444,49 K**.

## 9.2 Porovnání pozvolného ochlazování

Teplota [°C]	1:2		1:50		1:100		1:200	
	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování
	$\lambda[nm]$	$\lambda[nm]$	$\lambda[nm]$	$\lambda[nm]$	$\lambda[nm]$	$\lambda[nm]$	$\lambda[nm]$	$\lambda[nm]$
25	570,59	567,94	566,93	561,63	558,37	562,65	563,87	561,84
30	566,72	567,33	561,63	562,24	562,24	558,37	563,87	556,53
35	569,16	567,33	561,63	561,63	559,59	558,37	563,87	556,53
40	566,11	566,72	560	562,24	557,96	558,37	565,1	554,9
45	573,43	570,59	565,1	555,72	558,17	562,65	565,1	554,9
50	564,08	568,96	568,35	555,92	560,61	556,74	563,87	563,87
55	569,37	568,96	558,37	558,37	558,37	558,37	560,82	563,87
60	567,13	567,54	563,87	559,8	559,59	558,37	563,87	557,76
65	570,18	567,3	558,37	555,51	558,37	560,41	554,9	568,35
70	572,82	561,02	559,19	558,37	558,37	558,37	563,87	563,47
75	568,35	564,08	562,24	560,41	558,37	558,37	563,87	556,53
80	575,86	-	560,82	-	561,02	-	558,98	-
<b>Průměr</b>	<b>569,4833</b>	<b>567,07</b>	<b>562,2083</b>	<b>559,2582</b>	<b>559,2525</b>	<b>559,1855</b>	<b>562,6658</b>	<b>559,8681818</b>

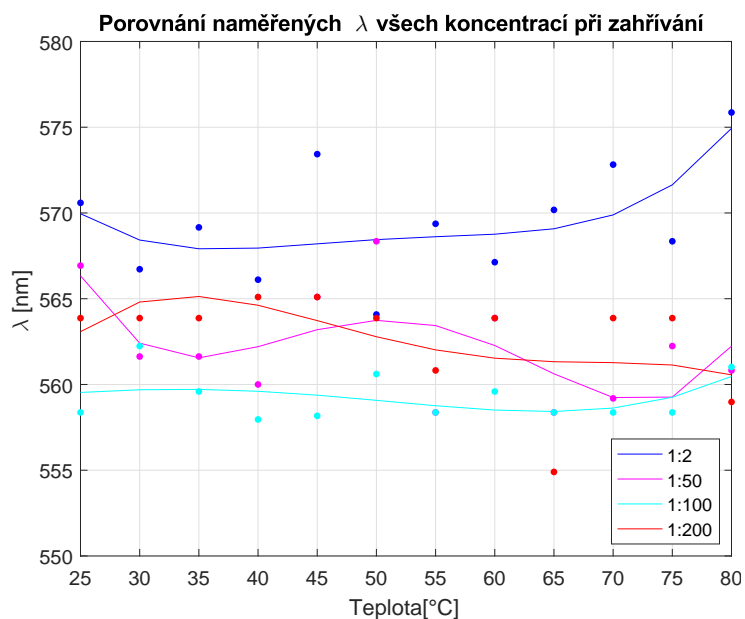
Tabulka 9.4: Porovnání naměřených výsledků vlnových délek pro širokopásmové světlo při měření pozvolného ochlazování

Teplota [°C]	1:2		1:50		1:100		1:200	
	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování
	Ra [-]	Ra [-]	Ra [-]	Ra [-]	Ra [-]	Ra [-]	Ra [-]	Ra [-]
25	83,63	71,25	81,77	82,87	73,64	75,9	69,44545	69,31538
30	71,83	67,24	79,62	77,32222	71,38889	76,65	68,43333	68,11818
35	80,06	80,3125	84,99	75,37	79,36	79,64444	70,14	69,25
40	82,31667	81,51667	85,50	64,51111	68,88889	70,8	73,85	68,50625
45	70,92	81,65	70,22	87,6	75,65	67,66667	70,52105	69,74
50	70,93333	89,01333	57,48	73,28571	67,13684	78,98571	69,72941	68,62143
55	74,51	81,3	55,47	62,54286	73,05	73,74	69,17143	68,19
60	83,02222	83,45	56,19	78,96	68,24	66,94	69,11429	68,55333
65	78	72,6	58,61	74,14	69,34	70,55	69,425	69,9
70	77,9375	79,14286	62,37	69,53	74,57	71,01	69,8	70,6
75	86,9	79,875	60,52	62,29	74,91429	65,82	70,00556	70,03182
80	89,9375	-	60,17	-	74,43333	-	69,375	-
<b>Průměr</b>	<b>79,16644</b>	<b>78,85003</b>	<b>67,7422</b>	<b>73,4929</b>	<b>72,55102</b>	<b>72,5188</b>	<b>69,91754</b>	<b>69,16604</b>

Tabulka 9.5: Porovnání naměřených indexů podání barev při měření pozvolného ochlazování

Teplota	1:2		1:50		1:100		1:200	
	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování
	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]
25	7877,6	21004,22	4676	4978,3	10053,6	9352,444	8621,045	12252
30	18387,11	24356	4757,889	4914,667	7268,889	10092,13	11610,11	8317,455
35	8063,5	8674,125	4632,875	5499,6	40234,3	20447,67	14683,2	8757,5
40	10476	8236	4649	5016	6885,444	6826,889	46203,33	9036,063
45	22589,8	5298,9	5244,4	5487,111	10898,33	6053,111	12492,32	14048,75
50	17490,36	5214,8	4209,3	8399,143	6059,842	32815,25	11861,71	8851
55	5033,6	5376	4191,2	4719,286	7405,8	8141,9	11842,43	9285,9
60	5178,556	8953,75	4184,6	5434,4	6478	5905,9	11624,79	9420,667
65	10223	13023	4196,2	8642,7	7230,6	7439,5	9540,375	11223,67
70	11731	10148,33	4303,9	6032,6	15675,3	7708,5	11636,47	14731
75	6716,333	15744,25	4212,7	4381,2	15245,5	5817,9	10981,72	10686,91
80	6947,125	-	4260,9	-	11002,75	-	10558,2	-
<b>Průměr</b>	<b>10892,83</b>	<b>11457,22</b>	<b>4459,914</b>	<b>5773,182</b>	<b>12036,53</b>	<b>10963,74</b>	<b>14304,64</b>	<b>10600,99</b>

Tabulka 9.6: Porovnání naměřených teplot chromatičností při měření pozvolného ochlazování

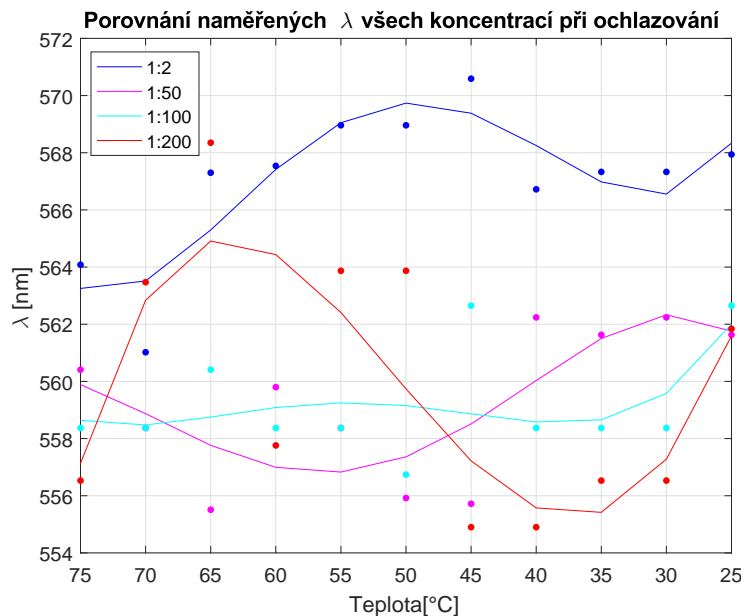


Obrázek 9.4: Porovnání naměřených  $\lambda$  všech koncentrací při zahřívání vzorků

V tabulce 9.4 lze vidět naměřené hodnoty maximálních vlnových délek pro zahřívání i ochlazování vzorku pro širokopásmové světlo. Z grafu 9.4 lze jednoduše zjistit, že trend křivky vlnové délky s koncentrací luminoforu 1:2 (modrá) je rostoucí. Trend vlnové délky pro luminofor s koncentrací 1:50 (růžová) je klesající s kosinovým charakterem již od začátku celého měření. Trend křivky pro luminofory s koncentrací 1:100 (světle modrá) je mírně klesající do 70 °C a od 75 °C mírně rostoucí. Trend křivky 1:200 (červená) je podobná s křivkou 1:50, obě mají klesající průběh s velmi podobnými vlnovými délkami. Z tabulky 9.4 jde jasně vidět, že nejvyšší maximální vlnové délky má koncentrace 1:2 a nejnižší 1:100. Tento fakt také vychází z toho, že průměrná  $\lambda$  při zahřívání pro



1:2 je **569,483**, pro 1:50 **562,208 nm**, pro 1:100 **559,253** a pro 1:200 **562,666 nm**.



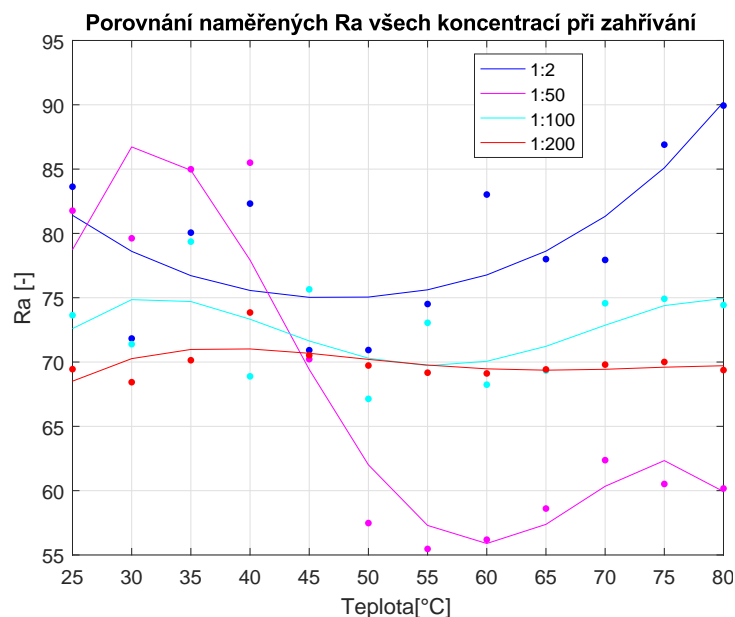
Obrázek 9.5: Porovnání naměřených  $\lambda$  všech koncentrací při ochlazování vzorků

Průběh ochlazování lze vidět na grafu 9.5, kde lze zjistit, že nejvyšší vlnové délky má opět koncentrace 1:2 (modrá), která má trend křivky rostoucí od 75 °C do 50 °C a od 45 °C do 30 °C je průběh klesající a v posledním kroku ochlazení vlnová délka vzrostla s konečnou vlnovou délkou větší než při 75 °C. Průměrná naměřená maximální vlnová délka při ochlazování je **567,07 nm**. Na začátku ochlazování byla počáteční vlnová délka **564,08 nm** a na konečných 25 °C **567,94 nm** to je posun o **3,86 nm**. Z toho vyplývá, že při ochlazování se maximální vlnová délka zvyšuje se zmenšujícím se teplotním namáháním.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:50 (růžová) má do teploty 55 °C klesající průběh a od 60 °C čistě rostoucí trend. Průměrná naměřená maximální vlnová délka při ochlazování je **559,258 nm**. Na začátku ochlazování byla počáteční vlnová délka **560,41 nm** a na konečných 25 °C **561,63 nm** to je posun o **1,22 nm**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:100 (světle modrá) má trend křivky rostoucí a průměrnou vlnovou délku **559,185**, kde na začátku ochlazování byla počáteční vlnová délka **558,37 nm** a na konečných 25 °C **562,65 nm** to je posun o **4,28 nm**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:200 (červená) má trend křivky sinusového charakteru. Průměrná naměřená maximální vlnová délka při ochlazování je **559,861 nm**. Na začátku ochlazování byla počáteční vlnová délka **556,53 nm** a na konečných 25 °C **561,84 nm** to je posun o **5,31 nm**.

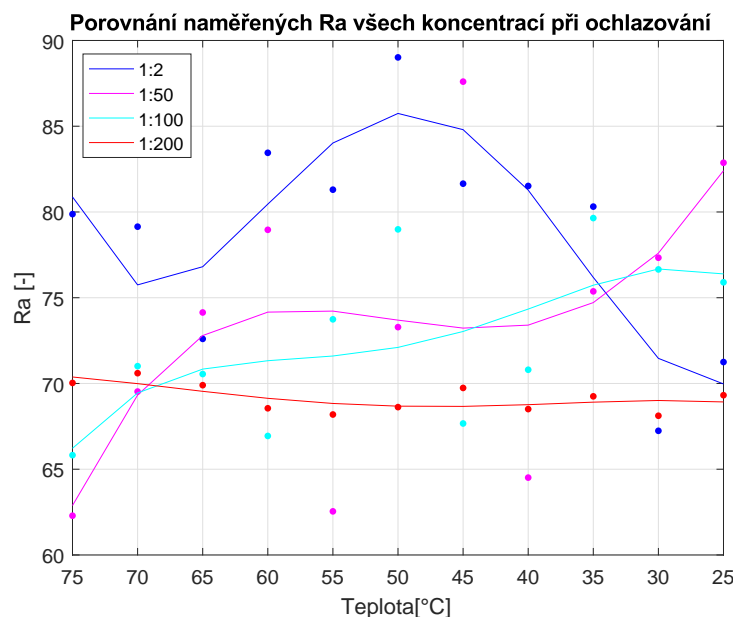


Obrázek 9.6: Porovnání naměřených indexů podání barev všech koncentrací při zahřívání vzorků

V tabulce 9.5 lze vidět naměřené hodnoty indexů podání barev pro zahřívání i ochlazování vzorku. Průběh měření indexu podání barev při zahřívání lze vidět na grafu 9.6, kde lze zjistit, že nejvyšší indexy podání barev (dále jako Ra) má koncentrace 1:2 (modrá), která má trend křivky klesající od 25 °C do 50 °C a od 55 °C do 80 °C je průběh rostoucí s konečným Ra větším než při 25 °C. Průměrný naměřený index při zahřívání je **79,16**. Na začátku zahřívání byl počáteční Ra **83,63** a na konečných 80 °C **89,93** to je posun o **6,3**. Z toho vyplývá, že při zahřívání se Ra zvyšuje se zvyšujícím se teplotním namáháním.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:50 (růžová) má silný klesající průběh. Průměrný naměřený Ra při zahřívání je **67,74 nm**. Na začátku zahřívání byl počáteční Ra **81,77** a na konečných 80 °C **60,17** to je posun o **21,60**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:100 (světle modrá) má trend křivky klesající do 55 °C a od 60 °C rostoucí průběh. Průměrný naměřený index při zahřívání je **72,55**, kde na začátku zahřívání byl počáteční index podání barev **73,64** a na konečných 80 °C **74,43** to je posun o **0,79**. Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:200 (červená) má trend křivky mírně rostoucí do 40 °C a od 45 °C mírně klesající. Průměrný naměřený index při zahřívání je **69,91**. Na začátku zahřívání byl počáteční Ra **69,46** a na konečných 80 °C **69,36** to je posun o **-0,07**.



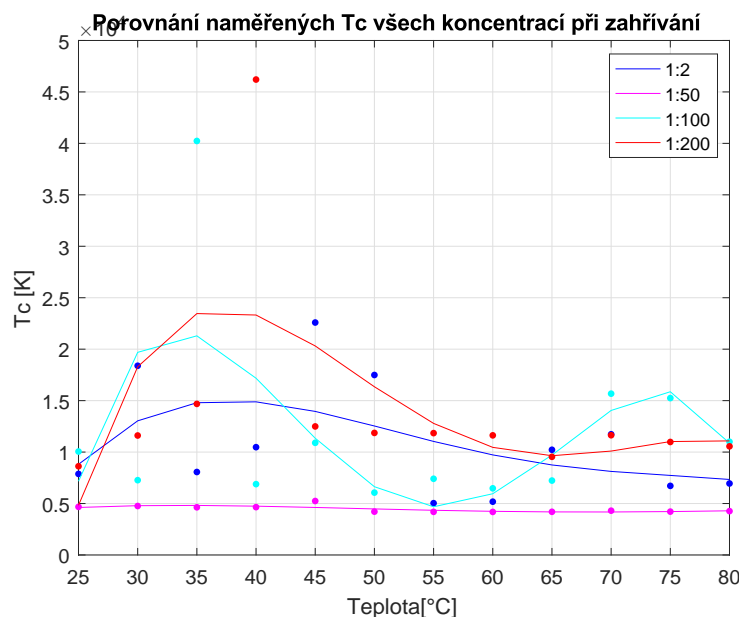
Obrázek 9.7: Porovnání naměřených indexů podání barev všech koncentrací při ochlazování vzorků

Průběh měření indexu podání barev při ochlazování lze vidět na grafu 9.7, kde lze zjistit, že křivka s koncentrací 1:2 (modrá) má trend rostoucí od 70 °C do 50 °C a od 55 °C do 25 °C je průběh klesající s konečným Ra nižším než při 75 °C. Průměrný naměřený index při ochlazování je **78,85**. Na začátku ochlazování byl počáteční Ra **79,88** a na konečných 25 °C **71,25** to je posun o **8,63**. Z toho vyplývá, že při ochlazování se Ra do určité teploty zvyšuje se snižujícím se teplotním namáháním a od určité teploty index podání barev klesá se snižujícím se teplotním namáháním pro koncentraci luminoforu 1:2.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:50 (ružová) má rostoucí průběh. Průměrný naměřený index podání barev při ochlazování je **73,49**. Na začátku ochlazování byl počáteční Ra **62,29** a na konečných 25 °C **82,87** to je posun o **20,58**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:100 (světle modrá) má trend křivky také rostoucí. Průměrný naměřený index při ochlazování je **72,5188**, kde na začátku ochlazování byl počáteční index podání barev **65,82** a na konečných 25 °C **75,9** to je posun o **10,08**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:200 (červená) má trend křivky mírně klesající do 50 °C a od 45 °C konstantní. Průměrný naměřený index při ochlazování je **69,17**. Na začátku ochlazování byl počáteční Ra **70,03** a na konečných 25 °C **69,32** to je posun o **-0,72**.



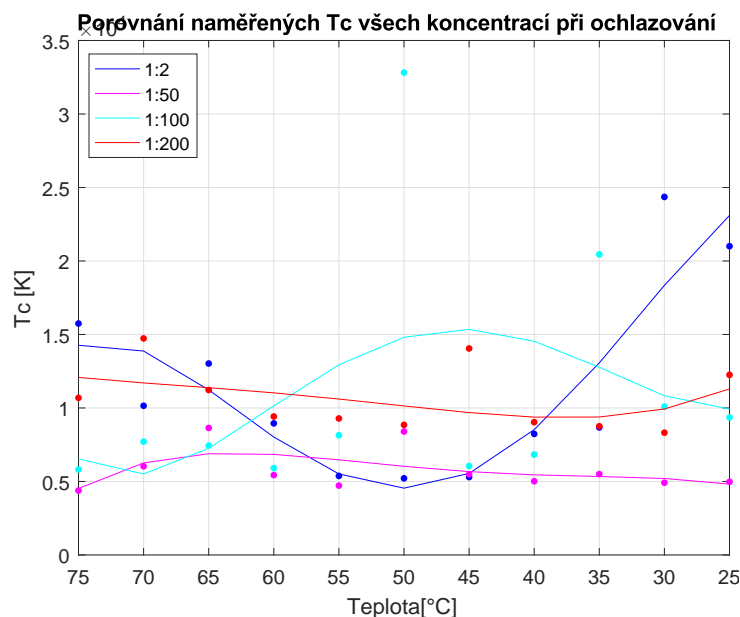
Obrázek 9.8: Porovnání naměřené teploty chromatičnosti všech koncentrací při zahřívání vzorků

V tabulce 9.6 lze najít naměřené teploty chromatičnosti pro zahřívání i ochlazování vzorku. Průběh měření teploty chromatičnosti při zahřívání lze vidět na grafu 9.8, kde lze zjistit, že průběh křivky koncentrace 1:2 (modrá) je rostoucí od 25 °C do 40 °C a od 45 °C do 80 °C je průběh klesající s konečnou teplotou chromatičnosti menší než při 25 °C. Průměrná teplota chromatičnosti při zahřívání je **10892,83 K** ačkoliv při teplotě 30 °C, 45 °C a 50 °C jsou naměřená data, která by se dala považovat za chybu a pokud bychom nepočítali tyto data, tak průměrná teplota by byla **8027,413 K**. Na začátku zahřívání byla počáteční teplota chromatičnosti **7877,6 K** a na konečných 80 °C **6947,125 K** to je snížení o **930,475 K**. Z toho vyplývá, že při zahřívání se teplota chromatičnosti snižuje se zvyšujícím se teplotním namáháním.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:50 (růžová) je velmi stabilní a konstantní. Průměrná teplota chromatičnosti při zahřívání je **4459,914 K**. Na začátku zahřívání byla počáteční teplota chromatičnosti **4676 K** a na konečných 80 °C **4260,9 K** to je snížení o **415,1 K**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:100 (světle modrá) má trend křivky sinusového charakteru. Průměrná naměřená teplota chromatičnosti při zahřívání je **12036,53 K**. Pokud by se nepočítalo do průměru 35 °C (40234,3 K), tak průměrná teplota chromatičnosti by byla **9473,01 K**, kde na začátku zahřívání byla počáteční teplota chromatičnosti **10053,6 K** a na konečných 80 °C **11002,75 K** to je posun o **949,15 K**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:200 (červená) má trend křivky rostoucí (hlavně z důvodu naměřené teploty **46203,33 K** při 40 °C) do 40 °C a od 45 °C klesající. Průměrná naměřená teplota chromatičnosti při zahřívání je **14304,64 K**. Pokud by se nepočítalo do průměru 40 °C, tak průměrná teplota chromatičnosti by byla **11404,76 K**. Na začátku zahřívání byla počáteční teplota chromatičnosti **8261,045 K** a na konečných 80 °C **10558,2 K** to je posun o **1937,155 K**.



Obrázek 9.9: Porovnání naměřené teploty chromatičnosti všech koncentrací při ochlazování vzorků

Průběh měření teploty chromatičnosti při ochlazování lze vidět na grafu 9.9, kde lze zjistit, že průběh křivky koncentrace 1:2 (modrá) je klesající od 75 °C do 50 °C a od 55 °C do 25 °C je průběh rostoucí. Průměrná teplota chromatičnosti při ochlazování je **11457,22 K**. Pokud bychom nepočítali do průměru 30 °C a 25 °C, tak průměrná teplota chromatičnosti by byla **8963,24 K**. Na začátku ochlazování byla počáteční teplota chromatičnosti **15744,25 K** a na konečných 25 °C **21004,22 K** to je posun o **5259,97 K**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:50 (růžová) má mírně rostoucí průběh do 65 °C a od 60 °C mírně klesající. Průměrná naměřená teplota chromatičnosti při ochlazování je **5773,18 K**. Na začátku ochlazování byla počáteční teplota chromatičnosti **4381,2 K** a na konečných 25 °C **4978,3 K** to je posun o **597,1 K**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:100 (světle modrá) má trend křivky rostoucí do 45 °C a od 50 °C klesající. Průměrná naměřená teplota chromatičnosti je **10963,74 K**. Pokud bychom nepočítali do průměru 50 °C (**32815,25 K**), tak průměrná teplota chromatičnosti by byla **8778,59 K**. Na začátku ochlazování byla počáteční teplota chromatičnosti **5817,9 K** a na konečných 25 °C **9352,44 K** to je posun o **3534,54 K**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:200 (červená) má trend křivky mírně klesající do 35 °C a od 30 °C rostoucí. Průměrná naměřená teplota chromatičnosti při ochlazování je **10600,99 K**. Na začátku ochlazování byla počáteční teplota chromatičnosti **10686,91 K** a na konečných 25 °C **12252 K** to je posun o **1565,09 K**.

### 9.3 Porovnání prudkého ochlazování

Teplota [°C]	1:2		1:50		1:100		1:200	
	Zahřívání $\lambda[nm]$	Ochlazování $\lambda[nm]$	Zahřívání $\lambda[nm]$	Ochlazování $\lambda[nm]$	Zahřívání $\lambda[nm]$	Ochlazování $\lambda[nm]$	Zahřívání $\lambda[nm]$	Ochlazování $\lambda[nm]$
25	568,76	569,98	564,89	558,37	559,59	562,86	563,87	563,87
30	568,35	566,93	558,37	558,37	558,37	559,59	563,87	563,87
35	564,89	568,35	557,35	561,84	557,76	558,37	562,65	558,37
40	567,13	567,13	560,21	563,87	559,59	558,37	556,53	558,37
45	564,28	569,16	562,65	558,37	555,92	560,21	558,37	563,87
50	567,54	567,54	558,37	557,96	562,24	562,24	556,53	558,37
55	568,15	567,13	559,19	562,24	558,37	561,84	558,37	563,87
60	567,13	567,54	558,37	557,15	561,02	558,37	556,53	563,87
65	569,37	568,96	558,37	563,47	562,24	556,33	559,8	563,87
70	566,72	567,94	568,76	559,59	557,76	562,86	563,87	563,87
75	567,54	573,43	560	564,49	558,37	562,24	556,53	558,37
80	568,55	572,01	561,84	564,49	562,24	563,47	556,53	556,53
<b>Průměr</b>	<b>567,3675</b>	<b>568,8416667</b>	<b>560,6975</b>	<b>560,850833</b>	<b>559,455833</b>	<b>560,5625</b>	<b>559,4541667</b>	<b>561,425</b>

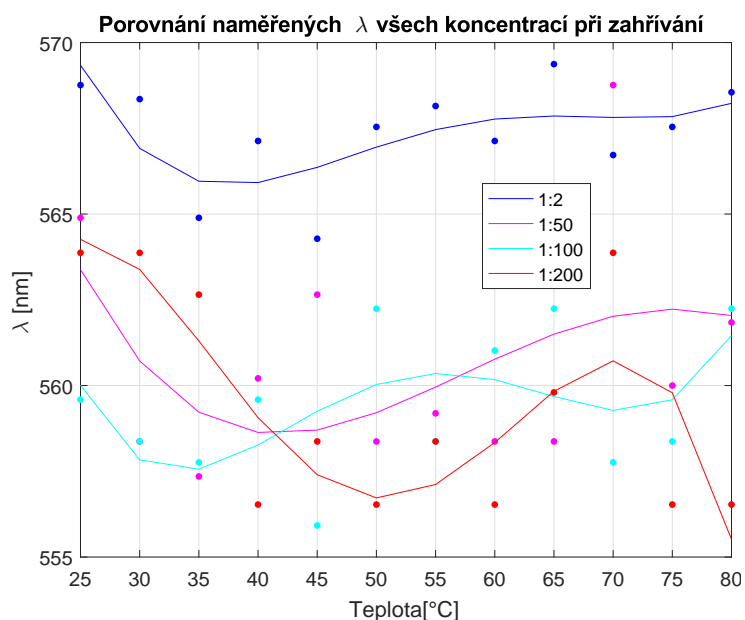
Tabulka 9.7: Porovnání naměřených výsledků vlnových délek pro širokopásmové světlo při měření prudkého ochlazování

Teplota [°C]	1:2		1:50		1:100		1:200	
	Zahřívání Ra [-]	Ochlazování Ra [-]	Zahřívání Ra [-]	Ochlazování Ra [-]	Zahřívání Ra [-]	Ochlazování Ra [-]	Zahřívání Ra [-]	Ochlazování Ra [-]
25	63,44	77,98	65,27	57,18	73,94444	70,76	69,58421	69,67667
30	75,41	69,52	61,79	58,2	71,91	76,68	69,525	69,80455
35	75,49	78,52	62,02	60,52	73,5375	75,66	73,2	73,825
40	68,23	70,93684	61,64	59,45	73,07778	78,75	69,225	72,07222
45	77,75	79,24375	61,59	60	72,91	78,25	71,7	71,47059
50	74,69	79,62222	61,72	62,39	73,1375	82,78	68,95	72,425
55	67,51	74,575	62,83	69,11	77,1	78,5	71,8	71,62222
60	78,36	78,4	63,48	73,54	71,1	72,08	69,15882	72,14375
65	70,3	79,8	73,26	60,02	76,5	78,78	70,54	70,42632
70	80,01	76,14	84,08	61,7	75,8	76,52	69,525	71,72
75	80,45	76,82222	64,27	70,15	74,93333	75	69,83684	72,025
80	78,18	80,00769	73,86	70,19	75	78,7	71,71765	71,45833
<b>Průměr</b>	<b>74,15167</b>	<b>76,79731</b>	<b>66,3175</b>	<b>63,5375</b>	<b>74,07921</b>	<b>76,87167</b>	<b>70,39688</b>	<b>71,5558</b>

Tabulka 9.8: Porovnání naměřených indexů podání barev při měření prudkého ochlazování

Teplota [°C]	1:2		1:50		1:100		1:200	
	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování
	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]
25	3879,2	12666,4	4921,8	4303,4	9033,222	6444,6	13391,58	12110,87
30	6278,8	4280,6	4280,5	4289,9	7013,6	8514,7	11988	11500,14
35	6125,6	6392,2	4275,8	4292,7	8025,5	10619,1	28481	21737
40	4583,9	4379,211	4303,8	4367,2	7172,125	34926,9	10550,25	14361,27
45	6820,8	6526,563	4290,2	4297,3	7688,2	16462	20287	13861,31
50	26028,8	7745,222	4291,3	4422	8056,375	14497,7	11068,25	32245,5
55	4197,7	5081,417	4296,1	5522,2	18135,25	12908	19859	13357,15
60	7659,9	6099,154	4304,7	7273	6658	6883,6	11955,53	15302
65	4369,2	7291	5159,1	4295	14584,5	24478,67	13775,13	11035,85
70	5807	5547,556	5413,3	4416,8	9515	12558	10956,21	16334,78
75	6293,2	14603,5	4316	5860,3	14537	9127	11319,29	15911,33
80	6008,7	7776,462	21138,6	5641,9	8564	14845	12444,5	14916,36
<b>Průměr</b>	<b>7337,733</b>	<b>7365,774</b>	<b>5915,933</b>	<b>4915,142</b>	<b>9915,231</b>	<b>14355,44</b>	<b>14672,98</b>	<b>16056,13</b>

Tabulka 9.9: Porovnání naměřených teplot chromatičností při měření prudkého ochlazování

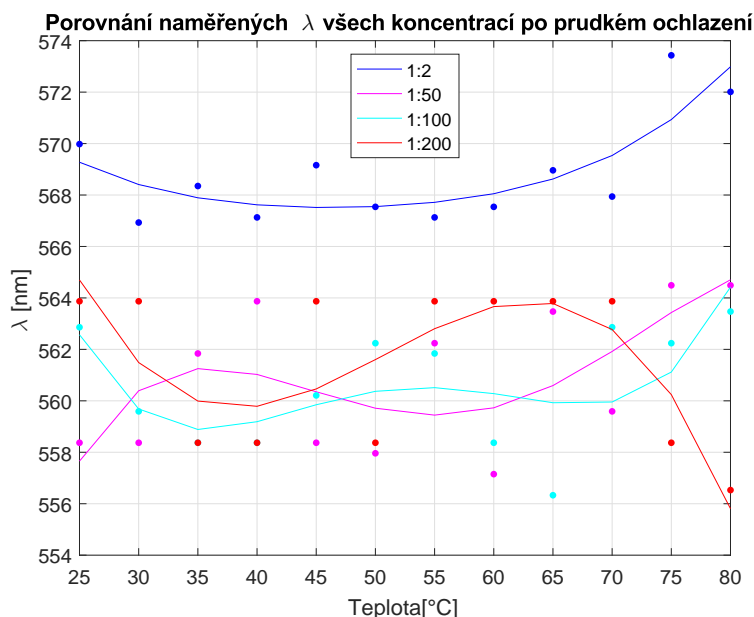


Obrázek 9.10: Porovnání naměřených  $\lambda$  všech koncentrací při zahřívání vzorků

V tabulce 9.7 lze vidět naměřené hodnoty maximálních vlnových délek pro zahřívání i pro ochlazování vzorku pro širokopásmové světlo. Z grafu 9.10 lze jednoduše zjistit, že trend křivky vlnové délky s koncentrací luminoforu 1:2 (modrá) je klesající do 40 °C a od 45 °C je trend rostoucí. Průměrná naměřená maximální vlnová délka při zahřívání je **567,3675 nm**. Na začátku zahřívání byla počáteční vlnová délka **568,76 nm** a na konečných 80 °C **568,55 nm** to je snížení o **0,21 nm**. Lze si také všimnout, že naměřené hodnoty jsou v porovnání s ostatními koncentracemi v průměru větší přibližně o **7 nm**.

Trend vlnové délky pro luminofor s koncentrací 1:50 (růžová) je klesající do 45 °C a od 50 °C rostoucí. Průměrná naměřená maximální vlnová délka při zahřívání je **560,698 nm**. Na začátku zahřívání byla počáteční vlnová délka **564,89 nm** a na konečných 80 °C **572,01 nm** to je posun o **2,03 nm**.

Křivka pro luminofor s koncentrací 1:100 (světle modrá) má kosinový charakter s rostoucím trendem. Průměrná naměřená maximální vlnová délka při zahřívání je **559,46 nm**. Na začátku zahřívání byla počáteční vlnová délka **559,59 nm** a na konečných 80 °C **562,24 nm** to je posun o **2,65 nm**. Trend křivky 1:200 (červená) je klesající do 50 °C a od 55 °C do 70 °C je trend rostoucí. Od 75 °C je trend klesající. Průměrná naměřená maximální vlnová délka při zahřívání je **559,45 nm**. Na začátku zahřívání byla počáteční vlnová délka **563,87 nm** a na konečných 80 °C **556,53 nm** to je pokles o **7,34 nm**.



Obrázek 9.11: Porovnání naměřených  $\lambda$  všech koncentrací po ochlazení vzorků

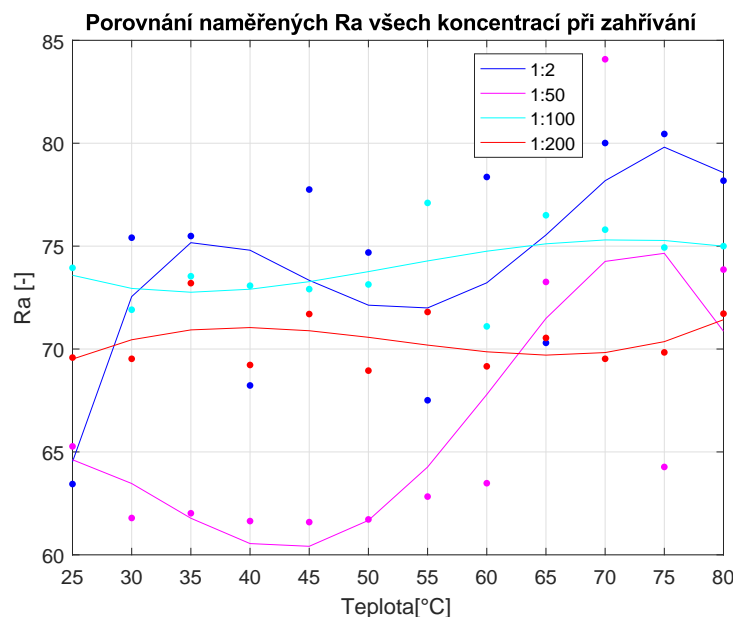
Průběh po prudkém ochlazení lze vidět na grafu 9.11, kde jde vidět, že nejvyšší vlnové délky má opět koncentrace 1:2 (modrá) s velmi podobným trendem jako tomu bylo při zahřívání. Trend křivky je klesající do 45 °C a od 50 °C je rostoucí. Průměrná naměřená maximální vlnová délka po prudkém ochlazení je **568,84 nm**. Na začátku byla počáteční vlnová délka **569,98 nm** a na konečných 80 °C **572,01 nm** to je posun o **2,03 nm**.



Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:50 (růžová) má roustoucí průběh sinusového charakteru. Průměrná naměřená maximální vlnová délka při ochlazování je **560,85 nm**. Na začátku ochlazování byla počáteční vlnová délka **558,37 nm** a na konečných 80 °C **564,49 nm** to je posun o **6,12 nm**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:100 (světle modrá) má trend křivky klesající do 35 °C a od 40 °C rostoucí do 55 °C, od 60 °C klesající a od 70 °C rostoucí. Průměrná vlnová délka po prudkém ochlazení je **560,56 nm**, kde na počátečních 25 °C byla vlnová délka **562,86 nm** a na konečných 80 °C **563,47 nm** to je posun o **0,61 nm**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:200 (červená) má trend křivky klesající do 35 °C a rostoucí od 40 °C a od 65 °C čistě klesající. Průměrná naměřená maximální vlnová délka po prudkém ochlazení je **561,42 nm**. Na počátečních 25 °C byla vlnová délka **563,87 nm** a na konečných 80 °C **556,53** to je pokles o **7,34 nm**.



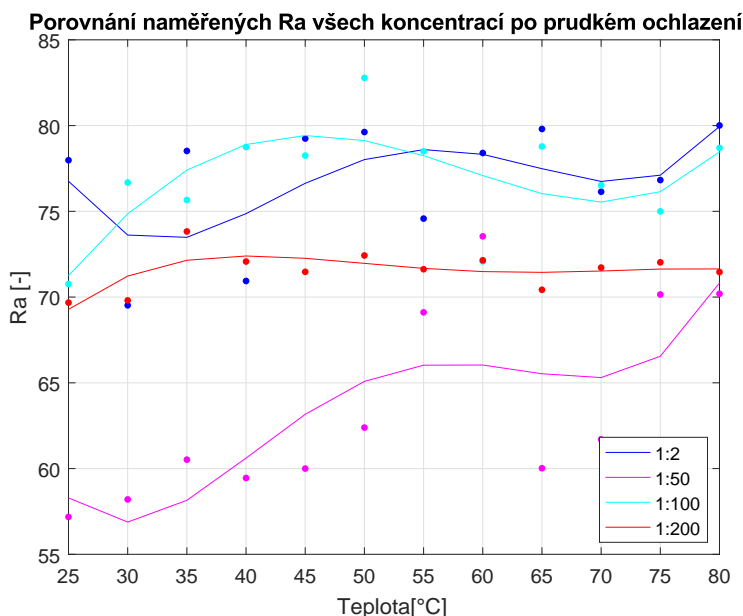
Obrázek 9.12: Porovnání naměřených indexů podání barev všech koncentrací při zahřívání vzorků

V tabulce 9.8 lze vidět naměřené hodnoty indexů podání barev pro zahřívání i ochlazování vzorku. Průběh měření indexu podání barev při zahřívání lze vidět na grafu 9.12, kde jde vidět, že vzorek s koncentrací 1:2 (modrá) má trend křivky rostoucí sinusového charakteru. Průměrný naměřený index při zahřívání je **74,15**. Na začátku zahřívání byl počáteční Ra **63,44** a na konečných 80 °C **78,18** to je posun o **14,74**. Z toho vyplývá, že při zahřívání se Ra zvyšuje se zvyšujícím se teplotním namáháním.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:50 (růžová) má kosinusový průběh s rostoucím trendem. Průměrný naměřený Ra při zahřívání je **66,31 nm**. Na začátku zahřívání byl počáteční Ra **65,27** a na konečných 80 °C **73,86** to je posun o **8,59**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:100 (světle modrá) má trend křivky mírně rostoucí. Průměrný naměřený index při zahřívání je **74,07**, kde na začátku zahřívání byl počáteční index podání barev **73,94** a na konečných 80 °C **75** to je posun o **1,055**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:200 (červená) má trend křivky mírně rostoucí. Průměrný naměřený index při zahřívání je **70,39**. Na začátku zahřívání byl počáteční Ra **69,58** a na konečných 80 °C **71,71** to je posun o **2,13**.



Obrázek 9.13: Porovnání naměřených indexů podání barev všech koncentrací po prudkém ochlazení vzorků

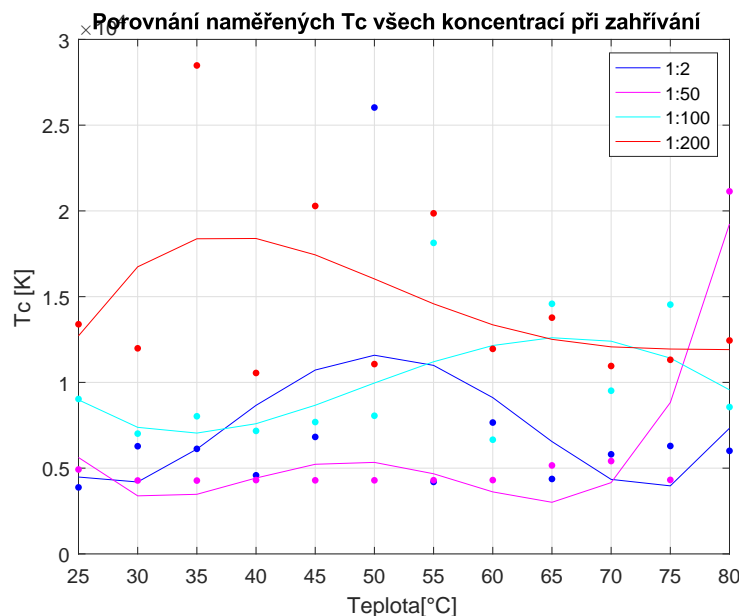
Průběh měření indexu podání barev po prudkém ochlazení lze vidět na grafu 9.13, kde jde vidět křivku koncentrace 1:2 (modrá), která má rostoucí trend s kosinovým charakterem. Průměrný naměřený index po prudkém ochlazení je **76,79**. Po prudkém ochlazení byl počáteční index **77,98** a na konečných 80 °C **80** to je posun o **2,02**. Z toho vyplývá, že i po prudkém ochlazení se Ra zvyšuje se zvyšujícím se teplotním namáháním.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:50 (ružová) má čistě rostoucí průběh. Průměrný naměřený index podání barev po prudkém ochlazení je **63,53**. NPo prudkém ochlazení byl počáteční index **57,18** a na konečných 80 °C **70,19** to je posun o **13,01**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:100 (světle modrá) má trend křivky rostoucí do 45 °C a od 50 °C trend křivky je klesající. V tomto případě jsou naměřené indexy velmi podobné se vzorkem 1:2. Průměrný naměřený index po ochlazení je **76,871**, kde na začátku byl počáteční index podání barev **70,76** a na konečných 80 °C **78,7** to je posun o **7,94**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:200 (červená) má trend křivky mírně rostoucí do 40 °C a

od 45 °C konstattní. Průměrný naměřený index při ochlazování je **71,55**. Na začátku byl počáteční Ra **69,67** a na konečných 80 °C **71,45** to je posun o **1,78**.



Obrázek 9.14: Porovnání naměřené teploty chromatičnosti všech koncentrací při zahřívání vzorků

V tabulce 9.9 lze najít naměřené teploty chromatičnosti pro zahřívání i ochlazování vzorku.

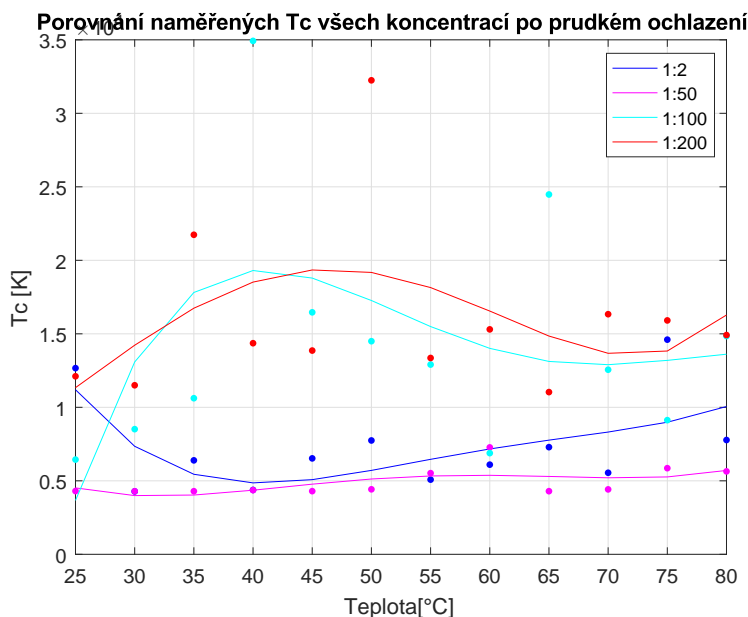
Průběh měření teploty chromatičnosti při zahřívání lze vidět na grafu 9.14, kde lze zjistit, že průběh křivky koncentrace 1:2 (modrá) je rostoucí od 25 °C do 50 °C a od 55 °C do 80 °C je průběh klesající. Průměrná teplota chromatičnosti při zahřívání je **7337,733 K** ačkoliv při teplotě 50 °C je naměřená teplota chromatičnosti, která by se dala považovat za chybu a pokud by se nepočítaly tyto data, tak průměrná teplota by byla **5638,545 K**. Na začátku zahřívání byla počáteční teplota chromatičnosti **3879,2 K** a na konečných 80 °C **6008,7 K** to je snížení o **2129,5 K**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:50 (růžová) konstantní do 60 °C a od 65 °C rostoucí. Průměrná teplota chromatičnosti při zahřívání je **5915,93 K** nicméně poslední hodnota by se dala pochopit jako chyba a bez ní by byla průměrná hodnota **4532,055**. Na začátku zahřívání byla počáteční teplota chromatičnosti **4921,8 K** a na konečných 80 °C **21138,6 K** to je nárůst o **16216,8 K**, pokud by se nebralo v potaz hodnotu na 80 °C, tak by to byl pokles o **605,8 K** a dalo by se očekávat, že křivka by byla mnohem méně rostoucí.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:100 (světle modrá) má rostoucí trend křivky kosinusového charakteru. Průměrná naměřená teplota chromatičnosti při zahřívání je **9915,231 K**. Pokud by se nepočítalo do průměru 55 °C (18135,25 K), tak průměrná teplota chromatičnosti by byla **9167,957 K**, kde na začátku zahřívání byla počáteční teplota chromatičnosti **9033,22 K** a na konečných 80 °C **8564 K** to je posun o **469,22 K**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:200 (červená) má trend křivky klesající od 40 °C (hlavně

z důvodu naměřené teploty **28481 K** při 35 °C, **20287 K** při 45 °C a **19859 K** při 55 °C ). Průměrná naměřená teplota chromatičnosti při zahřívání je **14672,98 K**. Pokud by se nepočítalo do průměru 35, 45 a 55 °C, tak průměrná teplota chromatičnosti by byla **11938,75 K**. Na začátku zahřívání byla počáteční teplota chromatičnosti **13391,58 K** a na konečných 80 °C **12444,5 K** to je posun o **947,07 K**.



Obrázek 9.15: Porovnání naměřené teploty chromatičnosti všech koncentrací po prudkém ochlazení vzorků

Průběh měření teploty chromatičnosti po prudkém ochlazení lze vidět na grafu 9.15, kde lze zjistit, že průběh křivky koncentrace 1:2 (modrá) je klesající od 25 °C do 40 °C a od 45 °C do 80 °C je průběh rostoucí. Průměrná teplota chromatičnosti po prudkém ochlazení je **7365,774 K**. Na začátku byla počáteční teplota chromatičnosti **12666,4 K** a na konečných 80 °C **7776,46 K** to je pokles o **4889,93 K**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:50 (růžová) má mírně rostoucí trend (téměř konstantní). Průměrná naměřená teplota chromatičnosti po prudkém ochlazení je **4915,14 K**. Na začátku byla počáteční teplota chromatičnosti **4303,4 K** a na konečných 80 °C **5641,9 K** to je posun o **1338,5 K**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:100 (světle modrá) má trend křivky rostoucí do 40 °C a od 45 °C klesající. Průměrný naměřený index při ochlazování je **14355,44 K**. Pokud by se nepočítalo do průměru 40 °C (**34926,9 K**) a 65 °C (**24478,67 K**), tak průměrná teplota chromatičnosti by byla **11285,97 K**. Na začátku byla počáteční teplota chromatičnosti **6444,6 K** a na konečných 80 °C **14845 K** to je posun o **8400,4 K**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:200 (červená) má velmi podobný trend jako vzorek 1:100.

Trend křivky je rostoucí do 45 °C a od 50 °C klesající. Průměrný naměřený index při ochlazování je **16056,13 K**. Pokud by se nepočítalo do průměru 35 °C (**21737 K**) a 50 °C (**32245,5 K**), tak průměrná teplota chromatičnosti by byla **13869,11 K**. Na začátku ochlazování byla počáteční teplota chromatičnosti **12110,87 K** a na konečných 80 °C **14916,36 K** to je posun o **2805,5 K**.

## 9.4 Porovnání měření opakovaného namáhání

Teplota [°C]	1:2		1:50		1:100		1:200	
	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování
	$\lambda[nm]$	$\lambda[nm]$	$\lambda[nm]$	$\lambda[nm]$	$\lambda[nm]$	$\lambda[nm]$	$\lambda[nm]$	$\lambda[nm]$
25	567,13	567,54	556,13	563,87	559,59	562,24	558,37	563,87
30	569,37	570,18	558,37	563,47	558,37	559,59	563,87	563,87
35	568,96	570,18	558,37	560,21	554,9	557,76	558,37	563,87
40	570,18	573,43	557,96	562,86	561,43	554,9	559,59	563,87
45	568,55	571,2	559,39	558,37	558,37	563,47	561,02	563,87
50	567,13	569,98	560,41	561,02	556,33	561,23	562,24	561,84
55	568,55	571,6	559,59	558,98	559,59	560,82	563,87	556,53
60	566,52	569,98	558,37	561,23	557,96	554,9	558,37	562,65
65	567,13	566,72	562,86	559,8	565,3	561,63	558,37	556,53
70	571,6	571,8	559,19	561,02	558,37	557,96	555,92	558,98
75	567,33	569,98	558,37	560,41	561,23	558,37	563,87	563,87
80	567,13	569,98	558,37	559,59	558,37	562,24	556,53	561,84
<b>Průměr</b>	<b>568,2983</b>	<b>570,2142</b>	<b>558,9483</b>	<b>560,9025</b>	<b>559,1508</b>	<b>559,5925</b>	<b>560,0325</b>	<b>561,7991667</b>

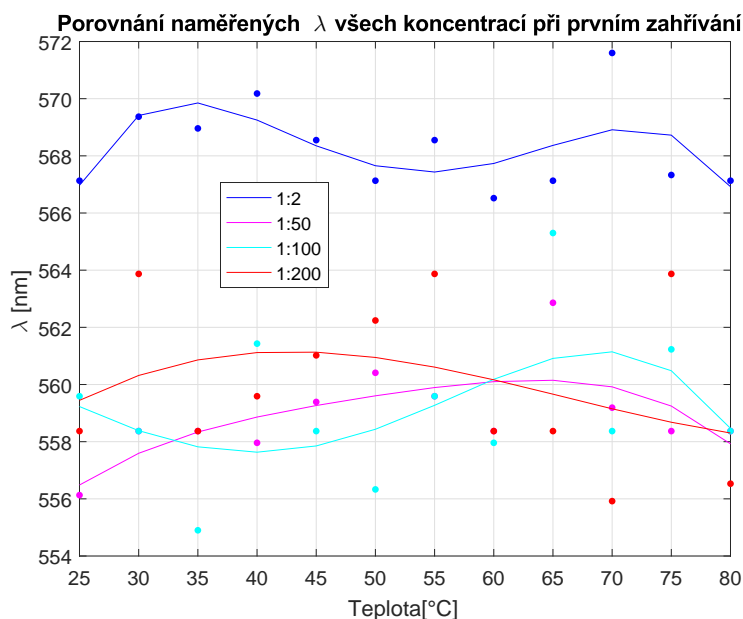
Tabulka 9.10: Porovnání naměřených výsledků vlnových délek pro širokopásmové světlo při měření opakovaného namáhání vzorku

Teplota	1:2		1:50		1:100		1:200	
	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování
	Ra [-]	Ra [-]	Ra [-]	Ra [-]	Ra [-]	Ra [-]	Ra [-]	Ra [-]
25	73,33333	78,35	75,79	60,78889	66,91	65,07	71,67778	60,38889
30	74,77778	71,62222	61,08	62,04444	66,41	67,92	70,04444	61,80526
35	79,51111	72,03333	62,02	69,19	66,68	70,26	74,9	60,50476
40	79,36667	67,10769	63,1	69,57778	67,66	66,71	74,01818	63,95882
45	75,73333	61,82222	64,2	62,98	67,96	69,36	75,42857	59,545
50	72,54444	80,71111	66,48	62,77	67,86	68,27	71,67143	70,98947
55	71,41111	86,21111	64,3111111	62,96	68,62	71,98	67,72273	65,34762
60	71,95556	79,58889	66,6888889	64,83	69,8	69,48	75,7	66,98571
65	75,35	80,32222	63,3111111	63,74	70,9	74,24	70,975	67,2
70	79,81111	80,42222	73,15	63,9	69,13	68,39	74	68,77407
75	79,5	80,3	62,0222222	80,76	71,8	70,61	60,61739	68,21905
80	80,15556	78,22	65,2444444	67,19	71,82	72,75	60,65714	69,32308
<b>Průměr</b>	<b>76,12083</b>	<b>76,39259</b>	<b>65,6164815</b>	<b>65,89426</b>	<b>68,7958333</b>	<b>69,5866667</b>	<b>70,61772</b>	<b>65,25348</b>

Tabulka 9.11: Porovnání naměřených indexů podání barev při měření opakovaného namáhání vzorku

Teplota	1:2		1:50		1:100		1:200	
	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování	Zahřívání	Ochlazování
	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]	Tc [K]
25	36379	5180	7983,1	4275,222	7133,9	5495,9	10724,72	5498,444
30	5999,444	15429,44	4286,1	4259,333	5802,1	6933,4	12363,22	5987,947
35	11399,67	11442,78	4298,1	5804	6264,9	7634,3	10535	5696,381
40	8502	7332	4309,4	5870,333	6420,3	5771,2	20998,82	7950,529
45	5765,111	9554,4	4332,3	4254,9	6588,3	7010,2	20393,62	5845,75
50	5076,889	4534,111	4382,1	4256,5	6351,4	6147,3	11478,64	10092,31
55	4754,889	6426,222	4310,556	4258,3	6762,5	8757,4	9661,864	7440,714
60	4720,778	6198,111	4399,222	4272,7	7254,4	7060,2	13486,31	8068,19
65	29648,5	5732,333	4299,444	4273,9	7825,5	11135,2	10705	7721,353
70	6434,778	6034,667	5121,3	4279	6993,6	6204,1	11999,14	9340,083
75	6041,667	6441,5	4274	5706,9	7445,875	7701,2	5435,826	12671,71
80	7351,333	7614,9	4304,111	4337,2	7839,4	9103,1	7288,19	9497,192
<b>Průměr</b>	<b>11006,17</b>	<b>7660,039</b>	<b>4691,644</b>	<b>4654,024</b>	<b>6890,18125</b>	<b>7412,792</b>	<b>12089,2</b>	<b>7984,217</b>

Tabulka 9.12: Porovnání naměřených teplot chromatičností při měření opakovaného namáhání vzorku



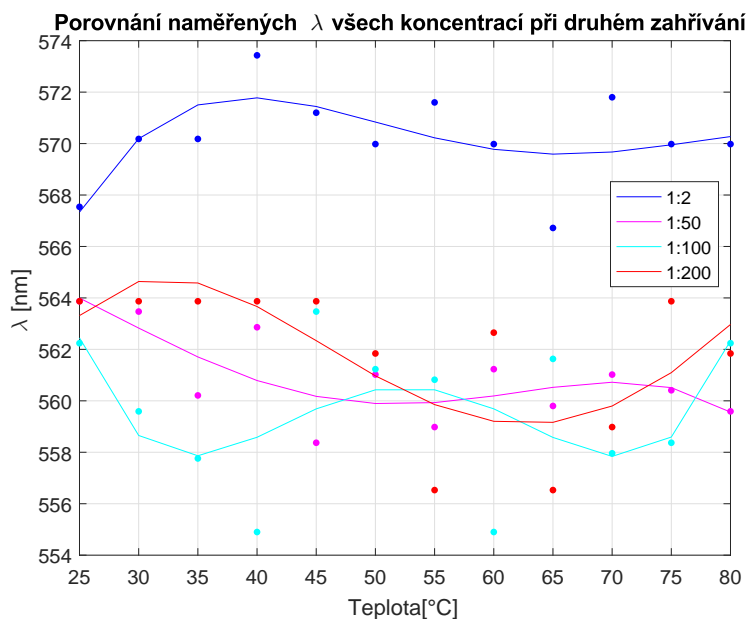
Obrázek 9.16: Porovnání naměřených  $\lambda$  všech koncentrací při prvním zahřívání vzorků

V tabulce 9.10 lze vidět naměřené hodnoty maximálních vlnových délek pro zahřívání i po ochlazení vzorku pro širokopásmové světlo. Z grafu 9.16 jde jednoduše zjistit, že trend křivky vlnové délky s koncentrací luminoforu 1:2 (modrá) má sinusový průběh s průměrnou vlnovou délkou při prvním zahřívání **568,298 nm**. Na začátku zahřívání byla počáteční vlnová délka **567,13 nm** a na konečných 80 °C taktéž **567,13 nm**. Lze si také všimnout, že naměřené hodnoty jsou v porovnání s ostatními koncentracemi v průměru větší přibližně o **8 nm**.

Trend vlnové délky pro luminofor s koncentrací 1:50 (růžová) je rostoucí do 65 °C a od 70 °C klesající. Průměrná naměřená maximální vlnová délka při zahřívání je **558,948 nm**. Na začátku zahřívání byla počáteční vlnová délka **556,13 nm** a na konečných 80 °C **558,37 nm** to je posun o **2,44 nm**.

Trend křivky pro luminofoxy s koncentrací 1:100 (světle modrá) je kosinusového charekteru, kde do 40 °C je klesající od 45 °C do 70 °C rostoucí a od 75 °C klesající. Průměrná naměřená maximální vlnová délka při zahřívání je **559,151 nm**. Na začátku zahřívání byla počáteční vlnová délka **559,59 nm** a na konečných 80 °C **558,37 nm** to je pokles o **1,22 nm**.

Trend křivky 1:200 (červená) je rostoucí do 45 °C a od 50 °C je trend klesající. Průměrná naměřená maximální vlnová délka při zahřívání je **560,033 nm**. Na začátku zahřívání byla počáteční vlnová délka **558,37 nm** a na konečných 80 °C **556,53 nm** to je pokles o **1,84 nm**.



Obrázek 9.17: Porovnání naměřených  $\lambda$  všech koncentrací po druhém teplotním namáhání vzorků

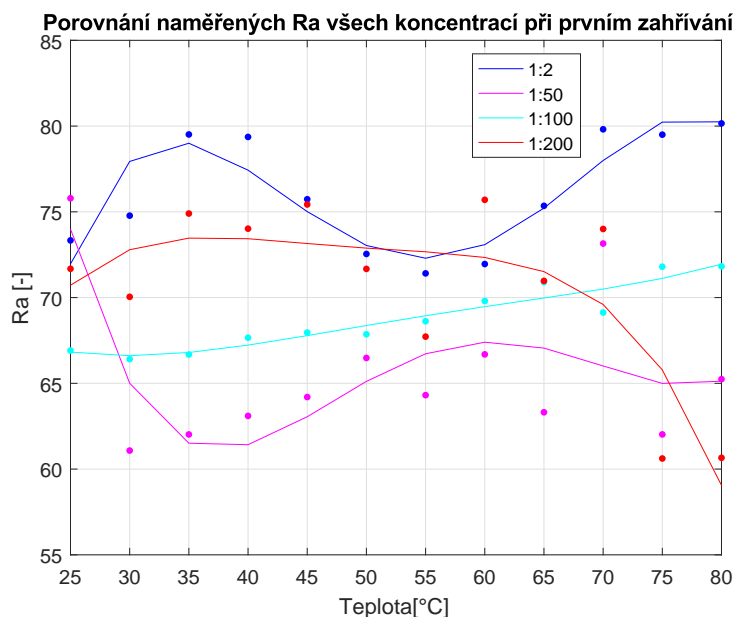
Průběh po druhém teplotním namáhání lze vidět na grafu 9.17, kde jde zjistit, že nejvyšší vlnové délky má opět koncentrace 1:2 (modrá) s velmi podobným trendem jako tomu bylo při zahřívání. Trend křivky je rostoucí do 40 °C a od 45 °C klesající a od 70 °C mírně rostoucí. Průměrná naměřená maximální vlnová délka po druhém teplotním namáhání je **570,214 nm**. Na začátku byla počáteční vlnová délka **567,54 nm** a na konečných 80 °C **569,98 nm** to je posun o **2,44 nm**.



Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:50 (ružová) má klesající průběh do 50 °C a od 55 °C mírně rostoucí do 70 °C. Průměrná naměřená maximální vlnová délka při ochlazování je **560,903 nm**. Na začátku měření byla počáteční vlnová délka **563,87 nm** a na konečných 80 °C **559,59 nm** to je pokles o **2,24 nm**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:100 (světle modrá) má trend kosinusové křivky, který klesá do 35 °C a do 55 °C roste, od 55 °C do 70 °C klesá a nakonec poslední dvě iterace měření roste. Průměrná vlnová délka po druhém teplotním namáhání je **559,5925 nm**, kde na počátečních 25 °C byla vlnová délka **562,24 nm** a na konečných 80 °C taktéž **562,24 nm**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:200 (červená) má sinusový trend křivky, kde v první iteraci měření vzroste a následě klesá do 60 °C a od 65 °C je trend křivky rostoucí. Průměrná naměřená maximální vlnová délka po druhém teplotním namáhání je **561,79 nm**. Na počátečních 25 °C byla vlnová délka **563,87 nm** a na konečných 80 °C **561,84** to je pokles o **2,03 nm**.



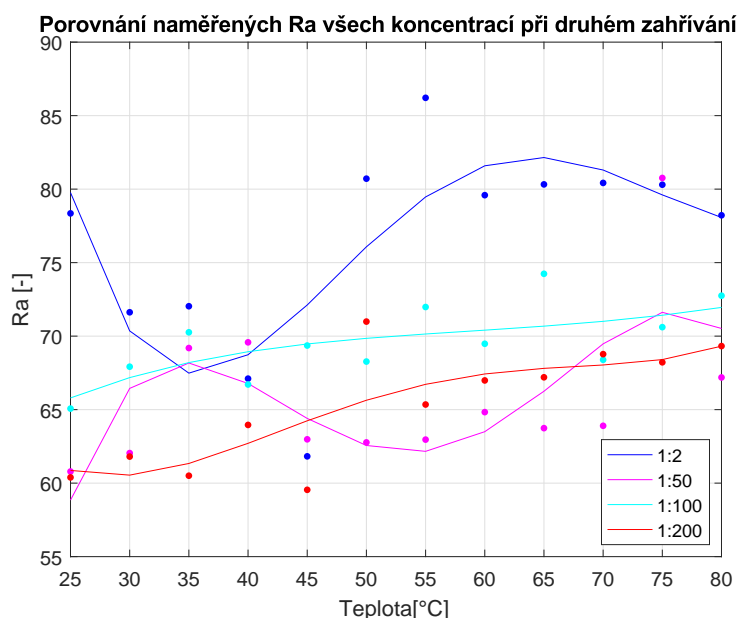
Obrázek 9.18: Porovnání naměřených indexů podání barev všech koncentrací při prvním zahřívání vzorků

V tabulce 9.11 lze vidět naměřené hodnoty indexů podání barev pro zahřívání i po ochlazení vzorku. Průběh měření indexu podání barev při zahřívání lze vidět na grafu 9.18, kde jde zjistit, že vzorek koncentrací s luminoforem 1:2 (modrá) má trend křivky sinusového charakteru. Průměrný naměřený index při zahřívání je **76,12**. Na začátku zahřívání byl počáteční Ra **73,33** a na konečných 80 °C **80,15** to je posun o **6,82 Ra**.

Vzorek s koncentrací luminoforu 1:50 (růžová) má ze začátku klesající průběh do 35 °C od 40 °C do 60 °C je chování vzorku s rostoucím trendem. Od 65 °C do 80 °C je křivka klesající. Průměrný naměřený Ra při prvním zahřívání je **65,61**. Na začátku zahřívání byl počáteční Ra **75,79** a na konečných 80 °C **65,24** to je pokles o **10,54**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:100 (světle modrá) má trend křivky lineárně rostoucí. Průměrný naměřený index při prvním zahřívání je **68,89**, kde na začátku zahřívání byl počáteční index podání barev **66,91** a na konečných 80 °C **71,82** to je posun o **4,91**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:200 (červená) je mírně klesající do 65 °C a od 70 °C index rapidně klesl. Průměrný naměřený index při prvním zahřívání je **70,61**. Na začátku zahřívání byl počáteční Ra **71,67** a na konečných 80 °C **60,65** to je pokles o **11,02**.



Obrázek 9.19: Porovnání naměřených indexů podání barev všech koncentrací po druhém teplotním namáhání vzorků

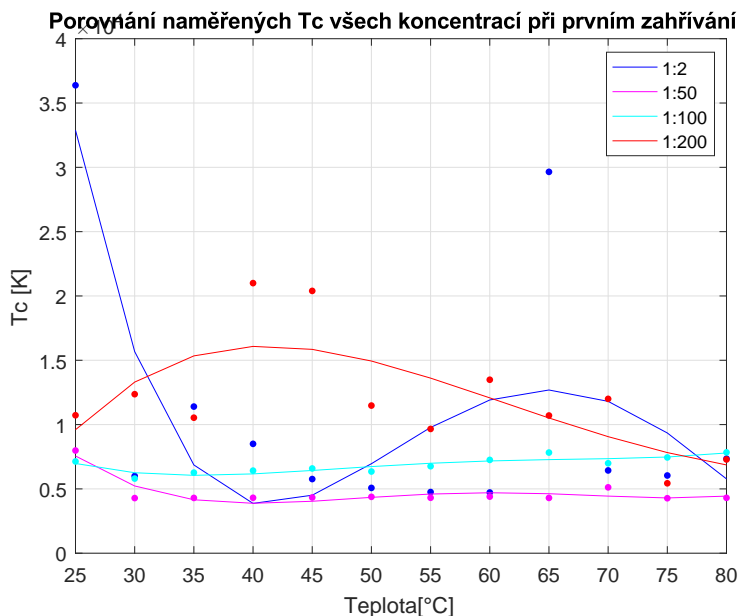
Průběh měření indexu podání barev po druhém teplotním namáhání lze vidět na grafu 9.19, kde lze vidět křivku koncentrace 1:2 (modrá), která má trend ze začátku prudce klesající a od 35 °C je trend křivky rostoucí do 65 °C a do 80 °C je trend klesající. Průměrný naměřený index po druhém teplotním namáhání je **76,39**. Na začátku měření byl počáteční index **78,35** a na konečných 80 °C **78,22** to je posun o **0,13**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:50 (růžová) je sinusového charakteru. Průměrný naměřený index podání barev při druhém zahřívání je **65,89**. Na začátku měření byl počáteční index **60,78** a na konečných 80 °C **67,19** to je posun o **6,40**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:100 (světle modrá) má trend křivky rostoucí po celou

dobu měření. Průměrný naměřený index po druhém teplotním namáhání je **69,58**, kde na začátku byl počáteční index podání barev **65,07** a na konečných 80 °C **72,75** to je posun o **7,68**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:200 (červená) má trend křivky taktéž rostoucí po celou dobu měření. Průměrný naměřený index při druhém teplotním namáhání je **65,25**. Na začátku byl počáteční index **60,38** a na konečných 80 °C **69,25** to je posun o **8,93**.



Obrázek 9.20: Porovnání naměřené teploty chromatičnosti všech koncentrací při prvním zahřívání vzorků

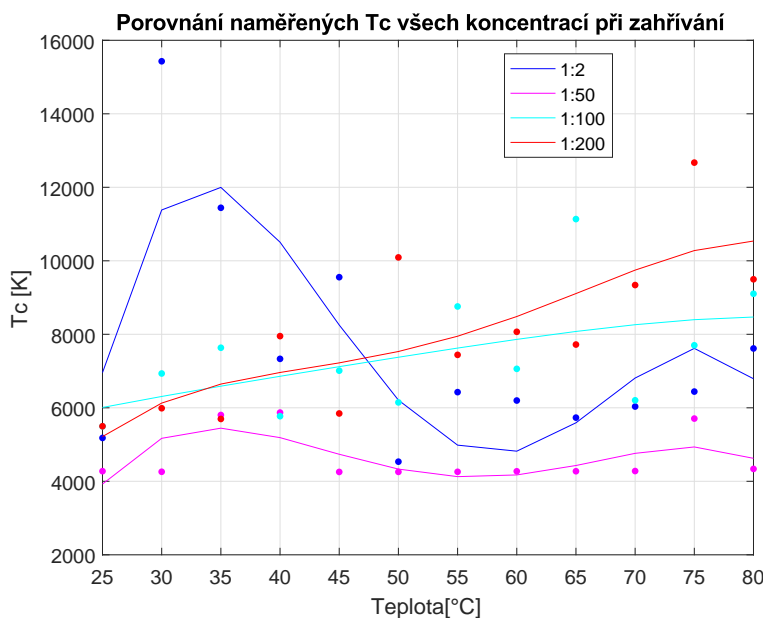
V tabulce 9.12 lze najít naměřené teploty chromatičnosti pro zahřívání i po ochlazení vzorků.

Průběh měření teploty chromatičnosti při zahřívání lze vidět na grafu 9.20, kde lze zjistit, že průběh křivky koncentrace 1:2 (modrá) je ze začátku měření prudce klesající a od 45 °C do 65 °C rostoucí a od 70 °C do 80 °C je průběh klesající. Průměrná teplota chromatičnosti při zahřívání je **11006,17 K** ačkoliv při teplotě 25 °C a 65 °C jsou naměřeny teploty chromatičnosti, které by se daly považovat za chybu a pokud by se nepočítaly do průměru, tak průměrná teplota by byla **6604,65 K**. Na začátku zahřívání byla počáteční teplota chromatičnosti **36379 K** a na konečných 80 °C **7351,33 K** to je snížení o **29027,66 K**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:50 (růžová) je klesající do 35 °C a od 40 °C je trend konstantní. Průměrná teplota chromatičnosti při zahřívání je **4691,644 K**. Na začátku zahřívání byla počáteční teplota chromatičnosti **7983,1 K** a na konečných 80 °C **4304,11 K** to je pokles o **3678,98 K**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:100 (světle modrá) má trend křivky mírně rostoucího charakteru (téměř konstantní). Průměrná naměřená teplota chromatičnosti při zahřívání je **6890,18 K**, kde na začátku zahřívání byla počáteční teplota chromatičnosti **7133,9 K** a na konečných 80 °C **7839,4 K** to je posun o **705,5 K**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:200 (červená) má trend křivky rostoucí do 40 °C a od 45 °C čistě klesající. Průměrná naměřená teplota chromatičnosti při zahřívání je **12089,2 K**. Na začátku zahřívání byla počáteční teplota chromatičnosti **10724,72 K** a na konečných 80 °C **7288,19 K** to je pokles o **3436,532 K**.



Obrázek 9.21: Porovnání naměřené teploty chromatičnosti všech koncentrací po druhém teplotním namáhání vzorků

Průběh měření teploty chromatičnosti při druhém tepelném namáhání lze vidět na grafu 9.21, kde lze zjistit, že průběh křivky koncentrace 1:2 (modrá) je sinusového charakteru, kde ze začátku je křivka rostoucí do 35 °C, od 40 °C do 60 °C je křivka klesající a do 80 °C je průběh rostoucí. Průměrná teplota chromatičnosti při druhém tepelném namáhání je **7660,03 K**. Na začátku byla počáteční teplota chromatičnosti **5180 K** a na konečných 80 °C **7614,9 K** to je vzrůst teploty chromatičnosti o **2434,9 K**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:50 (ružová) má rostoucí trend do 35 °C, od 35 °C do 60 °C klesající a od 65 °C rostoucí trend. Průměrná naměřená teplota chromatičnosti při druhém teplotním namáhání je **4654,024 K**. Na začátku byla počáteční teplota chromatičnosti **4275,22 K** a na konečných 80 °C **4337,2 K** to je vzrůst teploty chromatičnosti o **61,97 K**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:100 (světle modrá) má trend křivky rostoucí po celou dobu měření. Průměrná naměřená teplota chromatičnosti při druhém teplotním namáhání je **6890,18 K**.

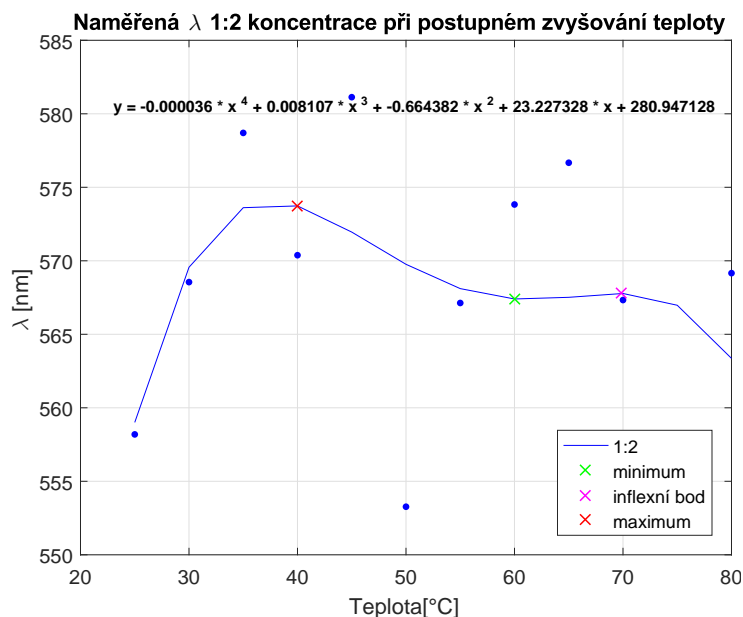
Na začátku byla počáteční teplota chromatičnosti **5495,9 K** a na konečných 80 °C **9103,1 K** to je vzrůst teploty chromatičnosti o **3607,2 K**.

Průběh vzorku s koncentrací luminoforu 1:200 (červená) má velmi podobný trend jako vzorek 1:100. Trend křivky je také rostoucí po celou dobu měření s vyššími hodnotami. Průměrná naměřená teplota chromatičnosti při druhém teplotním namáhání je **7984,217 K**. Na začátku měření byla počáteční teplota chromatičnosti **5498,44 K** a na konečných 80 °C **9497,192 K** to je vzrůst teploty chromatičnosti o **3998,75 K**.

### 9.4.1 Příklad analýzy z naměřených dat

V grafu 9.22 lze vidět ukázkou práce s naměřenými daty. V grafu jsou jednotlivé naměřené data v podobě teček proloženou polynomicou regresivní křivkou. Jde vidět i rovnice ze které se daná regresivní křivka matematicky počítá. Z rovnice lze zjistit, která z mocnin má nejvyšší dopad na regresi a pokud je mezi nějakou mocninou velký rozdíl v několika řádech, tak se ta menší složka nemusí brát v potaz a rovnice se díky tomu zjednoduší. Dále na grafu je naznačeno maximum, minimum a inflexní bod. Inflexní bod je bod ve kterém se křivka mění z ryze konvexní na ryze konkávní nebo naopak.

Takto interpretovaná data lze použít pro lepší pochopení chování vzorku při teplotním namáhání a pokud je potřeba, tak je možné více prozkoumat tyto zajímavé body z grafu proč právě je maximum na teplotě 40 °C a minimum na 60 °C například pomocí zahřívání vzorku na dané teplotě s mnohem menším krokem než 5 °C. Tato naměřená data mohou být použity jako podklad právě pro prozkoumávání do větší hloubky chování PDMS s luminofory při teplotním namáhání.



Obrázek 9.22: Naměřené hodnoty vlnových délek pro vzorek s koncentrací 1:2 při měření postupného zvyšování teploty

## Kapitola 10

# Závěr

Tato práce v teoretické části pojednává o zdrojích záření s důrazem na LED diody a laserové diody. Dále se zabývá základy luminiscence a jevům jako jsou fosforescence a fluorescence. Následně v této práci jsou rozebrány základy kolorimetrie, kde se tato práce zabývá diagramem chromatičnosti, teplotou chromatičnosti a indexem podání barev. V poslední teoretické části se tato práce věnuje materiálu polydimethylsiloxan (PDMS) z pohledu mechanických, optických vlastností a využití v praxi. Práce s PDMS je spolu s luminoforem QMK58/F-U2 důkladně popsána v praktické části.

V praktické části je nejprve podrobně popsán celkový proces výroby PDMS vzorků společně s luminoforem. Pro tuto práci bylo vyrobeno celkově šestnáct vzorků s koncentrací luminoforu 1:2, 1:50, 1:100 a 1:200. Celé praktické měření bylo rozděleno do čtyř menších měření pro různé možné situace. Prvním měření bylo postupné zvyšování teploty, druhé měření bylo postupné ochlazování, třetí bylo prudké ochlazení a čtvrté bylo měření s odstupem času. Pro každé měření byl využit unikátní vzorek to znamená, že pro jednu koncentraci luminoforu byly využity čtyři unikátní vzorky. Celkově bylo využito 16 vzorků.

Cílem této diplomové práce bylo prozkoumat teplotní stabilitu PDMS vzorků s luminoforem, kde při každém měření byly měřeny parametry maximální vlnové délky spolu s intenzitou pro modré i širokopásmové světlo, dále se měřila teplota chromatičnosti a index podání barev. V kapitole Měření jsou podrobně popsány naměřená data s grafy pro každý typ měření s jednotlivými koncentracemi luminoforu. V následující kapitole jsou porovnávány jednotlivá měření mezi sebou. Jako zdroj záření byla využita laserová dioda s  $\lambda = 450\text{nm}$ . Naměřené vlnové délky v modrém světle se pohybovaly pro všechna měření kolem **447 nm**. Ve výsledném porovnávání vlnové délky modrého světla nebyly zahrnuty z důvodu časté saturace ve spektrometru a díky tomuto jevu byly naměřené vlnové délky zkresleny.

V prvním měření postupného zvyšování teploty měly vzorky s koncentrací luminoforu 1:2 nejvyšší průměrnou vlnovou délku (**568,23 nm**) a nejmenší vlnové délky vzorky s koncentrací luminoforu 1:50 (**560,96 nm**). V porovnání indexů podání barev mezi jednotlivými koncentracemi má opět nejvyšší průměrné hodnoty vzorek s koncentrací 1:2 (**89,96**) a nejnižší průměrné indexy

podání barev má vzorek s koncentrací 1:200 (**74,18**). Z grafu 9.2 lze zjistit, že při teplotě 50 °C dochází ke změně chování průběhu indexu podání barev pro každý vzorek. Naměřené data teplot chromatichnosti byly v tomto měření vyvážené, kde vzorek s koncentrací luminoforu 1:50 jako jediný se pohyboval na teplotě **5000 K** a ostatní vzorky se pohybovaly kolem teploty **10000 K**.

V porovnání měření pozvolného ochlazování při prvotním zahřívání vzorku má vzorek s koncentrací luminoforu 1:2 nejvyšší průměrnou vlnovou délku (**569,48 nm**) a nejmenší průměrnou vlnovou délku má vzorek s koncentrací 1:100 (**559,25 nm**). Při postupném ochlazování nejvyšší vlnovou délku měl opět vzorek s koncentrací 1:2 (**567,07 nm**) a nejnižší taktéž stejně jako při zahřívání vzorek s koncentrací luminoforu 1:100 (**559,18 nm**). Nejvyšší průměrný index podání barev při zahřívání byl naměřen u vzorku s koncentrací 1:2 (**79,16**) a nejnižší index podání barev u vzorku s koncentrací luminoforu 1:50 (**67,74**). Při ochlazování nejvyšší indexy byly opět naměřeny pro vzorek 1:2 (**78,85**) a nejmenší index podání barev má tentokrát vzorek s koncentrací 1:200 (**69,16**). Při měření teploty chromatichnosti v prvotním zahřívání měl vzorek s koncentrací luminoforu 1:200 nejvyšší naměřenou průměrnou teplotu chromatichnosti (**14304,64 K**) a nejmenší naměřená teplota chromatichnosti byla u vzorku s koncentrací 1:50 (**4459,91 K**). Při pozvolném ochlazování nejvyšší teplotu chromatichnosti měl vzorek s koncentrací luminoforu 1:2 (**11457,22 K**) a nejnižší teplotu chromatichnosti při pozvolném ochlazování měl vzorek s koncentrací luminoforu 1:50 (**5773,18 K**).

Třetí měření zkoumalo co se stane se vzorkem pokud se prudce ochladí v krátkém časovém úseku hned po jeho zahřívání. Při zahřívání vzorku nejvyšší průměrná vlnová délka byla naměřena u vzorku s koncentrací luminoforu 1:2 (**567,36 nm**) a nejnižší průměrná vlnová délka byla naměřena u vzorku s koncentrací luminoforu 1:200 (**559,45 nm**). Po prudkém ochlazení se naměřená data výrazně nezměnily. Největší průměrnou vlnovou délku měl stále vzorek s koncentrací luminoforu 1:2 (**568,84 nm**) a nejnižší vlnovou délku měl tentokrát vzorek s koncentrací 1:100 (**559,45 nm**). Při porovnávání indexů podání barev mezi jednotlivými koncentracemi před ochlazením vzorek s koncentrací luminoforu 1:2 měl nejvyšší naměřené indexy (**74,15**) a vzorek s koncentrací luminoforu 1:50 měl nejnižší index podání barev (**66,31**). Po prudkém ochlazení vzorky 1:2 a 1:100 byly na tom velmi podobně (**76,79** a **76,87**) a nejnižší index po prudkém ochlazení měl vzorek 1:50 (**63,53**). Při zkoumání chování teploty chromatichnosti vzorek s koncentrací luminoforu 1:200 měl nejvyšší hodnoty (v průměru **14672,98 K**) a nejnižší teploty chromatichnosti měl vzorek s koncentrací luminoforu 1:50 (**5915,93 K**). Po prudkém ochlazení nejvyšší teplota chromatichnosti byla pořád u vzorku s koncentrací 1:200 (**16056,13 K**) a nejnižší taktéž u vzorku s koncentrací 1:50 (**4915,142 K**).

Čtvrté a poslední měření zkoumalo jaké chování bude mít vzorek pokud se po určité době bude znova teplotně namáhát. Při prvním teplotním namáhání vzorek s koncentrací 1:2 měl nejvyšší vlnové délky (**568,29 nm**) a vzorek s koncentrací 1:50 měl nejnižší vlnové délky (**558,94 nm**). Při opakovaném zahřívání vzorek s koncentrací 1:2 měl opět nejvyšší vlnové délky (**570,21 nm**) a nejnižší měl tentokrát vzorek s koncentrací 1:100 (**559,59 nm**). Při prvním měření indexů podání barev vzorek s koncentrací 1:2 měl nejvyšší naměřený průměrný index (**76,120**) a nejnižší průměrný



index měl vzorek s koncentrací 1:50 (**65,61**). Při druhém teplotním namáhání naměřené hodnoty se extrémně neodlišovaly od naměřených dat při prvním zahřívání. Nejvyšší index podání barev měl opět vzorek s koncentrací 1:2 (**76,39**) a nejnižší vzorek s koncentrací 1:200 (**65,25**). Při prvním měření teploty chromatičnosti vzorek s koncentrací 1:200 měl průměrně největší teploty chromatičnosti (12089,2 K) a vzorek s koncentrací 1:50 měl nejnižší průměrnou teplotu chromatičnosti (**4691,64 K**). Při druhém teplotním namáhání nejvyšší průměrná teplota chromatičnosti byla naměřena u vzorku s koncentrací luminoforu 1:200 (**7984,21 K**) a nejnižší u vzorku s koncentrací 1:50 (**4654,02 K**).

Z naměřených hodnot lze jasně vidět, že vzorek s koncentrací 1:2 má nejčastěji největší naměřené hodnoty ( $\lambda$ , Ra, Tc) a vzorek s koncentrací luminoforu 1:50 má naopak nejčastěji nejmenší naměřené hodnoty ( $\lambda$ , Ra, Tc). Tato diplomová práce objevila, že na poměru luminoforu s PDMS záleží a nemají stejné chování při stejném teplotním namáhání ačkoliv naměřené hodnoty nejsou vždy od sebe výrazně odlišné. Tato práce může sloužit jako podklad pro další prozkoumání PDMS materiálu s luminoforem, kde by se mohly podrobněji prozkoumat zajímavé body z jednotlivých grafů (minum, maximum, inflexní bod).

# Literatura

1. Ing. Petr Šiška, Ph.D. a kolektiv. Optoelektronika [online]. Ostrava, 82 s. [cit. 2021-04-21].
2. Ing. Jan Vitásek, Ph.D. Optické atmosferické komunikace [online]. Ostrava, 2014, 163 s. [cit. 2021-04-21].
3. Ohno Y. (2013) Color Quality of White LEDs. In: Seong TY., Han J., Amano H., Morkoc H. (eds) III-Nitride Based Light Emitting Diodes and Applications. Topics in Applied Physics, vol 126. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5863-6\\_13](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5863-6_13)
4. JARGUS, Jan, Jan NEDOMA a Radek MARTINEK. Dependence of CCT and CRI on the variable excitation wavelength and on the weight ratio of the phosphor in polydimethylsiloxane. 2019. ISSN 1841-7132.
5. prof. Ing. Jiří Habel, DrSc. Základy světelné techniky (5): Základy nauky o barvě (2. část) [online]. Elektrotechnická fakulta ČVUT v Praze, 2009 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40236.pdf>
6. Ing. Petr Šiška, Ph.D. a kolektiv. Nekomunikační aplikace optických vláken [online]. Ostrava, 100 s. [cit. 2021-04-21].
7. VÁCLAVÍK, Adam. Analýza optických prvků z Polydimethylsiloxanu (PDMS)[online]. Ostrava, 2016 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/115972>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
8. HUB, Michal. Flexibilní světlovod [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/128654>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
9. Polydimethylsiloxane [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polydimethylsiloxane#/media/File:PmdsStructure.png>
10. Sylgard 184 Silicone Elastomer: Technical Data Sheet [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.dow.com/content/dam/dcc/documents/en-us/productdatasheet/11/11-31/11-3184-sylgard-184-elastomer.pdf?iframe=true>

11. Sylgard 184 Silicone Elastomer: Dow corning [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: [https://research.engineering.ucdavis.edu/ncnc/wp-content/uploads/sites/11/2013/05/Sylgard\\_184\\_data\\_sheet.pdf](https://research.engineering.ucdavis.edu/ncnc/wp-content/uploads/sites/11/2013/05/Sylgard_184_data_sheet.pdf)
12. SpectraSuite: Spectrometer Operating Software [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://mmrc.caltech.edu/Biologic%20Stopped%20Flow/Manuals/Ocean%20Optics/SpectraSuite.pdf>
13. HC-DT-613: Digitální teploměr s dvojitým vstupem [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/czn.729-098.1.pdf>